

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh nízkotlakého regeneračního ohřevače vody a návrh
využití odpadné vody

Proposal of Regenerative Heat Exchanger and Utilization of
Waste Water

Študent:

Bc. Petričko Lukáš

Vedúci diplomovej práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Petričko**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh nízkotlakého regeneračního ohříváku vody a návrh využití
odpadní vody**
**Proposal of Regenerative Heat Exchanger and Utilization of Waste
Water**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte konstrukční návrh nízkotlakého regenerativního ohříváku vody pro jadernou elektrárnu VVER 440 s výkonem 500 MWe po rekonstrukci turbíny.
V návrhu proveďte tepelný a hydraulický výpočet. Naznačte zjednodušený výrobní postup.
Zpracujte dále návrh využití odpadní vody v EJB pro vytápění.
Navrhněte technologický okruh, výpočet množství energie v odpadní vodě, návrh technického řešení způsobu vytápění (popis, schéma zapojení, dimenzování zařízení), odborný odhad nákladu na výstavbu a provoz navrženého způsobu vytápění (energeticko - ekonomická analýza).

Seznam doporučené odborné literatury:


HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

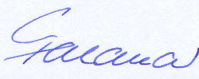
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

PREHLÁSENIE ŠTUDENTA

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu, v rámci príloh vypracoval samostatne a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave.....8.5.2012

Podpis.....

PodĎakovanie

Touto cestou si dovoľujem poďakovať sa vedúcemu diplomovej práce prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za odbornú pomoc a cenné rady, ktoré mi poskytol pri jej vypracovaní.

Prehlasujem, že:

- bol som zoznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, hlavne §35 – užitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školných predstavení a užitie diela školného a §60 – školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nezárobkovo k svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu použiť (§35 odst.3).
- súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej práce. Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z inej strany, uzavrú licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu §12 odst.4 autorského zákona.
- bolo zjednané, že užiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnutie licencie k jej použitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave: 8.5.2012



Adresa trvalého pobytu:

Vyšný Mirošov 89, 090 11 Vyšný Orlík,
Svidník

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

PETRIČKO, L. Návrh nízkotlakového regeneračného ohrievača vody a návrh využitia odpadnej vody.

Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava 2012, 90 s. Diplomová práca, vedúci: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Diplomová práca pojednáva o konštrukčnom návrhu nízkotlakového regeneračného ohrievača vody (NTO) pre jadrovú elektrárňu VVER 440 po využití jej projektorových rezerv. Prvá časť vychádza z výpočtu parametrov sekundárneho okruhu a projektorových rezerv systému VVER 440. Druhá časť obsahuje návrh koncepcie NTO, ktorá pozostáva z konštrukčného usporiadania, tepelného a hydraulického výpočtu.

Posledná časť poukazuje na problematiku využitia odpadnej vody pre vytápanie v EJB. Účelom tohto návrhu je výpočet množstva energie v odpadnej vode, technické riešenie spôsobu vytápania a v neposlednom rade odborný odhad nákladov na výstavbu a prevádzku navrhnutého spôsobu vytápania.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PETRIČKO, L. Proposal of Regenerative Heat Exchanger and Utilization of Waste Water

Ostrava: Department of energy engineering, Faculty of mechanical engineering, VŠB – Technical University Ostrava, 2012, 90 pages, Thesis head: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

Master thesis dissertates about construction proposal of regenerative heat exchanger (NTO) for nuclear power plant VVER 440 after its projector's reserves use.

First section starts from calculation of secondary circuit parameters and projector's reserves of VVE 440 system. Second part contains proposal for NTO conception which includes also construction configuration, heat and hydraulics' calculation.

The last section is pointing out the problematic of the waste water use for heating in EJB. Purpose of this proposal is calculation of energy volume in waste water, technical solution of heating technique and also professional cost estimating for building-up and running of the proposed heating technique.

Obsah

Zoznam použitých symbolov, označení a skratiek	9
0. Úvod.....	15
1. Technologické systémy VVER 440	16
1.1. Primárny okruh jadrovej elektrárne	16
1.2. Sekundárny okruh jadrovej elektrárne.....	17
1.3. Vodné hospodárstvo	18
1.4. Odpadné teplo.....	20
2. Výpočet parametrov sekundárneho okruhu elektrárne	22
2.1. Výpočet expanzie páry v turbíne	23
2.2. Výpočet ohrievania napájacej vody.....	26
2.3. Výpočet účinnosti navrhutej elektrárne	32
3. Využitie projektových rezerv VVER 440.....	35
3.1. Technické oblasti	35
3.1.1. Zmeny na vybraných systémoch a zariadeniach:.....	36
3.2. Úpravy technologických zariadení v rámci projektových rezerv	36
3.2.1. Reaktor s palivom vyššieho obohatenia.....	36
3.2.2. Modernizácia vysokotlakých dielov parných turbín.....	37
3.2.3. Výmena prietochných častí NT dielu	38
3.2.4. Úprava statoru generátora	39
3.2.5. Náhrada meracích dýz a VT odlučovačov na parovodoch	40
3.2.6. Zámena materiálu trubiek kondenzátora.....	40
3.2.7. Zvýšenie hltnosti prepúšťacích staníc do kondenzátoru turbín	41
3.2.8. Modernizácia blokových transformátorov	41
3.2.9. Úpravy monitorovacieho systému transformátora.....	42
3.2.10. Upgrade systému monitorovania (SCORPIO – VVER).....	42
4. Návrh koncepcie NTO 01	43
4.1. Konštrukčný návrh NTO 01	43

4.1.1. Konštrukčné usporiadanie.....	44
4.1.2. Určenie množstva napájacej vody	44
4.1.3. Konštrukčné predpoklady	45
4.1.4. Konštrukčný výpočet teplosmernej plochy.....	45
4.1.5. Zavalcovanie výhrevných trubiek.....	46
4.2. Voľba materiálu pre NTO 01	49
4.3. Zváranie NTO 01	52
4.3.1. Zvariteľnosť oceli	52
4.3.2. Zváranie tlakových nádob.....	54
4.3.3. Kontrola zvarovaných spojov	55
4.3.4. WIG	56
4.3.5. Automat pod tavidlom	57
4.4. Výrobný postup	59
5. Tepelný výpočet NTO 01	61
5.1. Tepelná bilancia.....	61
5.2. Stredný logaritmický rozdiel teplôt	62
5.3. Strana vody	62
5.3.1. Stredná teplota napájacej vody	62
5.3.2. Prietoková plocha.....	63
5.3.3. Stredná rýchlosť vody v trubke.....	63
5.3.4. Reynoldsovo číslo.....	63
5.3.5. Nusseltovo číslo	63
5.3.6. Súčiniteľ prestupu tepla na strane vody	64
5.3.7. Tepelný odpor na strane vody.....	64
5.4. Strana páry.....	64
5.4.1. Súčiniteľ prestupu tepla pre blanovú kondenzáciu	65
5.4.2. Tepelný odpor na strane páry.....	65
5.5. Stena trubky	65
5.5.1. Tepelný odpor steny trubky	65

5.6. Prestup tepla	65
5.7. Upresnenie teploty steny	65
5.8. Tepelný tok	66
5.9. Veľkosť teplosmernej plochy	66
6. Hydraulický výpočet	67
6.1. Tlaková strata trením	68
6.2. Tlaková strata miestnymi odpormi	68
6.2.1. Rozdeľovacia komora	68
6.2.2. Prepúšťacia komora	69
6.2.3. Vstup do trubkovnice	69
6.2.4. Výstup z trubkovnice	70
6.2.5. Vstup do rozdeľovacej komory	70
6.2.6. Výstup z rozdeľovacej komory	70
6.3. Celková tlaková strata	71
7. Návrh využitia odpadnej vody	72
7.1. Výpočet množstva energie v odpadnej vode	72
7.2. Návrh vytápania	74
7.3. Zdroj tepla, tepelné čerpadlo	75
7.3.1. Návrh topnej sústavy s tepelným čerpadlom	76
7.3.2. Výpočet potreby tepla na vytápanie	77
7.3.3. Výpočet potreby tepla na ohrev úžitkovej vody	79
7.3.4. Voľba súčastí	79
7.4. Ekonomické zhodnotenie	83
7.4.1. Porovnanie pôvodnej a navrhutej topnej sústavy	83
8. Záver	87
9. Použitá literatúra	88
10. Prílohy	90

Zoznam použitých symbolov, označení a skratiek

c	merná tepelná kapacita	$[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$
d_e	vonkajší priemer trubky	$[mm]$
d_i	vnútorný priemer trubky	$[mm]$
D	počet dennostupňov	$[^{\circ}C]$
D_{max}	maximálny priemer zväzku	$[mm]$
g	gravitačné zrýchlenie	$[m.s^{-2}]$
i	entalpia	$[kJ.kg^{-1}]$
i_{an}	merná entalpia na vstupe n-tého dielu turbíny ($n = 1,2$)	$[kJ.kg^{-1}]$
i_{en}	merná entalpia na výstupe n-tého dielu turbíny ($n = 1,2$)	$[kJ.kg^{-1}]$
i_n	merná entalpia vody za n-tým ohrievačom napájacej vody ($n = 1,2,..,6$)	$[kJ.kg^{-1}]$
i_{on}	merná entalpia odberovej páry ($n = 1,2,...,6$)	$[kJ.kg^{-1}]$
i_n'	merná entalpia odpovedajúceho tlaku sýtosti kondenzujúcej páry	$[kJ.kg^{-1}]$
l	dĺžka trubky	$[mm]$
L	vzdialenosť medzi prepážkami	$[mm]$
P	výkon	$[MW]$
P_E	výkon elektrárne na svorkách elektrického generátora	$[MW]$
P_{CV}	vlastná spotreba elektrárne	$[MW]$
P_G	výkon párneho generátora	$[MW]$
p	tlak	$[MPa]$
p_{pg}	tlak sýtej pary v parnom generátore	$[MPa]$
p_{e1}	tlak za stredotlakovým dielom turbíny	$[MPa]$
p_{on}	odberový tlak ($n = 1,2,...,6$)	$[MPa]$
Δp_{TR}	trecia strata v trubkách	$[MPa]$
Δp_K	tlaková strata v rozdeľovacej komore	$[MPa]$
Δp_p	tlaková strata v prepúšťacej komore	$[MPa]$
Δp_T	tlaková strata na vstupe do trubkovnice	$[MPa]$

Δp_{VT}	tlaková strata na výstupe z trubkovnice	[MPa]
Δp_{RK}	tlaková strata na vstupe do rozdeľovacej komory	[MPa]
Δp_{VRK}	tlaková strata na výstupe z rozdeľovacej komory	[MPa]
Pr	Prandtlovo číslo	[1]
r	Výparné teplo vody	[J.kg ⁻¹]
R	tepelný odpor	[m ² .KW ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	plocha	[m ²]
S_{vh}	prierez vstupného hrdla	[m ²]
s	hrúbka	[mm]
Q	tepelný tok	[W]
Q_c	celková tepelná strata objektu	[kW]
Q_{mP}	množstvo vyrobenej páry	[kg.s ⁻¹]
T	priemerná teplota	[°C]
t	teplota	[°C]
t_{vn}	teplota za n-tým ohrievačom napájacej vody (n = 1,2,...,6)	[°C]
t_{sn}	teplota sýtosti odpovedajúca tlaku odberovej pary (n = 1,2,...,6)	[°C]
t_{ST}	teplota steny	[°C]
$\Delta t'$	rozdiel teplôt páry a vstupnej vody	[°C]
$\Delta t''$	rozdiel teplôt páry a výstupnej vody	[°C]
Δt_s	stredný logaritmický rozdiel teplôt	[°C]
T_s^x	stredná teplota chladiča v parnom generátore	[K]
V	celková potreba TUV behom dňa	[kg.m ⁻³]
M	prietok	[kg.hod ⁻¹]
n	počet trubiek v jednom ťahu	[ks]
Nu	Nusseltovo číslo	[1]
x	suchosť	[1]
x_n	relatívne množstvo odberovej pary (n = 1,2,...,6)	[1]
y_n	relatívne množstvo kondenzátu (n = 1, 2, 3)	[1]

z	počet ťahov	[1]
ε	opravný súčiniteľ	[1]
α	súčiniteľ prestupu tepla	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
η	účinnosť	[1]
η_{me}	mechanická a elektrická účinnosť turbogenerátoru	[1]
η_{te}	tepelná účinnosť párneho obehu vzhľadom na svorky ele. generátoru	[1]
η_{ti}	vnútorná tepelná účinnosť párneho cyklu	[1]
η_v	dynamická viskozita vody	$[Pa.s]$
w_v	stredná rýchlosť vody	$[m/s]$
ρ_v	hustota vody	$[kg.m^{-3}]$
λ	merná tepelná vodivosť	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2/s]$
φ_{CV}	relatívna vlastná spotreba elektrárne	[1]

Dolný index

e	vplyv zníženia teploty v miestnosti behom dňa či noci
emin	výpočtová vonkajšia teplota
NV	napájacia voda
pg	párny generátor
o	odberový
svl	studena voda v lete
svz	studená voda v zime
ST	stredotlakový diel turbíny
NT	nízkotlakový diel turbíny
v	voda
TR	trubka
P	pára
r	regulácia sústavy
vh	vstupné hrdlo
K	rozdeľovacia komora
i	vplyv filtrácie
P	prepúšťacia komora
t,d	denná potreba tepla
T	trubkovnica
RK	rozdeľovacia komora
zuz	zúžený
cel	celková

Skratky

ABB	Fúzia spoločnosti Brown Boveri a ASEA-Atom
AGR	Advanced Gas Cooled
AP1000	Advanced Pressurized Water Reactor 1000 MWe

Ar	Argón
BWR	Boiling Water Reactor
C	uhlík
CANDU	Canada Deuterium Uranium, Reactor
CCHV	cirkulačne chladiaca voda
Cr	Chróm
ČSN	Česká štátna norma
EAMS	European Approval for Material Standarts
EMDS	European Material Data Sheet
EPR	European Pressurized Water Reactor
EU	Európska únia
FBR	Fast Breeder Reactor
GCR	Gas Cooled Reactor
GOST	Gosstandart
GWd/t	GigaWatt deň na tonu
He	Hélium
HTGR	High Temperature Gas-Cooled Reactor
HV	tvrdosť podľa Vickersa
HVB	hlavný výrobný blok
IAEA	International Atomic Energy Agency
JE	jadrová elektrárň
LWR	Light Water Reactor
MAG	Metal Activ Gas
MIG	Metal Inert Gas
Mo	Molybdén
MOX	(U,Pu)O ₂ Mixed-Oxide Fuel
Mn	Mangán
MWe	Megawatt elektrický
MWt	Megawatt tepelný

NH ₄ OH	Hydroxid Amónny
NPI	Nuclear Power International
NT	nízkotlakový diel turbíny
NTO	nízkotlaký regeneračný ohrievač vody
O ₂	Kyslík
P	Fosfor
PA	poloha zvárania, zhora
PB	poloha zvárania, v pravo hore
PED	Pressure Equipment Directive
PG	Parogenerátor
PWR	Pressurized-Water Reactor
RTG	Röntgen
S	Síra
SCORPIO	upgrade systému monitorovania stavu aktívnej zóny
SCWR	Supercritical Water-Cooled Reactor System
Si	Kremík
TČ	tepelné čerpadlo
TIG	Tungsten Inert Gas
TOO	tepelne ovplyvnená oblasť
TVD	technická voda dôležitá
TVN	technická voda nedôležitá
TUV	teplá úžitková voda
VT	vysokotlaký diel turbíny
VVER	Vodo -Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
WIG	Wolfram Inert Gas
WPS	Welding Procedure Specification
WPQR	Welding Procedure Qualification Record

0. Úvod

S rozvojom spoločnosti prichádza masívna elektrifikácia, rozšírenie závislosti ľudstva na elektrickej energii. Nevôľa ľudstva na elektrickej energii je zrejmá. S týmto predpokladom prichádza mnoho problémov (nedostatok nerastných surovín, vzrastajúci dopyt, celosvetová kríza, špekulácie na burzách...)

Realita je taká, že základným zdrojom výroby elektrickej energie sú tepelné a jadrové elektrárne. Jadrová energia, čo by najmladší zdroj výroby, vychádza z reaktorov II. generácie, ktoré boli testované ešte na prvotných prototypoch. Tieto elektrárne tvoria základ súčasných komerčných reaktorov pracujúcich dodnes. Je zreteľné, že potenciál týchto priemyselných oblastí nie je naplno využitý, preto prebieha snaha o využitie ich projektorových rezerv a taktiež o využitie odpadového tepla. V podstate ide o prenesenie zvýšeného výkonu, za čo najmenších strát do elektrickej sústavy. Ide o obrovský rozsah inovácií rôznych technologických celkov v rôznych priemyselných oblastiach s jasnou víziou zvýšenia inštalovaného výkonu elektrární.

Rovnako rada priemyselných oblastí potenciál prebytočnej tepelnej energie má, no bohužiaľ nie vždy a ak vôbec k jeho vyžitiu dôjde. Vytápanie objektov či príprava teplej vody sa javí ako široké pole pôsobnosti rôznych technológií no i zaujímavých ekonomických možností. Je nevyhnutné pripomenúť, že je potreba nájsť pomyselnú hranicu medzi finančnou a technologickou stránkou, čo sa výroby elektrickej energie týka.

Aj keď nás možno budúcnosť výroby elektrickej energie posunie iným smerom, momentálne sa kladie dôraz na výkonové rezervy, minimalizáciu strát a taktiež na využitie odpadového tepla. Dané fakty nás nútia premýšľať nad návrhmi rôznych technologických celkov a súčasti. Samozrejme, že bádanie nepoľavuje a hľadajú sa nové riešenia a alternatívy, ktoré nás opäť posunú o niečo ďalej.

1. Technologické systémy VVER 440

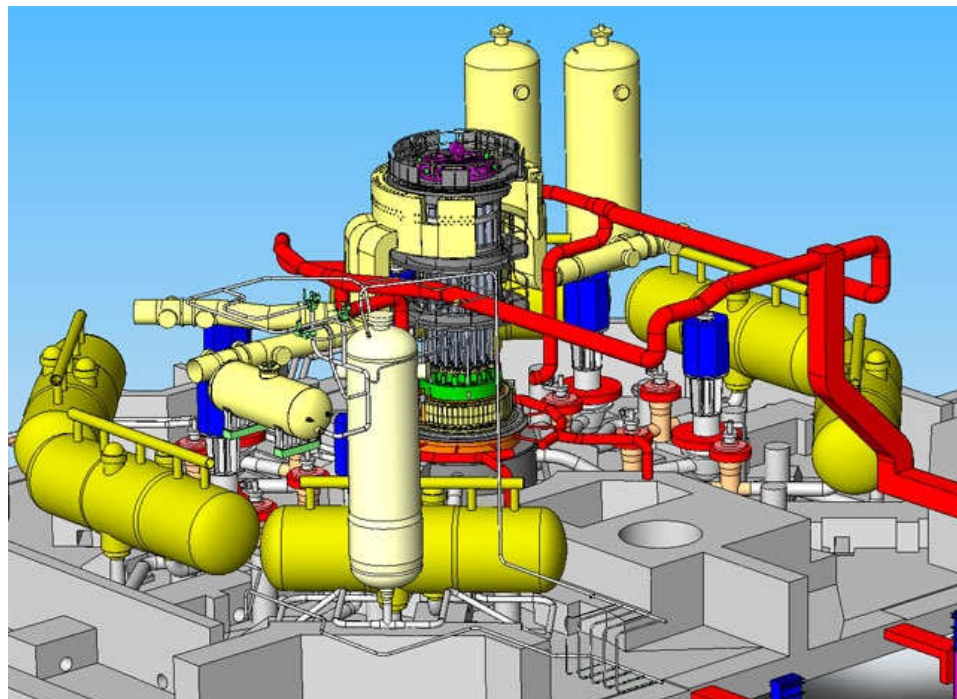
1.1. Primárny okruh jadrovej elektrárne

Primárnym okruhom jadrovej elektrárne je systém zariadení, v ktorom sa jadrová energia mení na tepelnú.

Základné zariadenia tohto okruhu:

- Reaktor
- Parogenerátor
- Hlavné cirkulačné čerpadlo
- Kompenzátor objemu
- Primárne potrubie

Obr. 1 Primárny okruh jadrovej elektrárne VVER 440, 3D model [7]



Zdrojom tepelnej energie v jadrovej elektrárni je štiepna reakcia, ktorá prebieha v aktívnej zóne reaktora. Tepelnú energiu odvádza z reaktora chladiaca voda, ktorá prúdi okolo palivových článkov prostredníctvom šiestich cirkulačných slučiek pripojených na reaktor. Vysoký tlak, ktorý je v reaktore a v celom primárnom okruhu, zabraňuje vode vriieť. Z reaktora postupuje zahriata voda cez hlavné uzatváracie armatúry do parogenerátorov, kde odovzdáva svoju energiu vode sekundárneho okruhu.

Tlak vody v sekundárnom okruhu je nižší ako v primárnom okruhu a sekundárna voda v parogenerátore sa premieňa na paru. Ochladená voda primárneho okruhu sa vracia z parogenerátorov späť do aktívnej zóny reaktora cez hlavné cirkulačné čerpadlá, ktoré udržiavajú obeh vody v primárnom okruhu. Na jednu z cirkulačných slučiek je pripojený kompenzátor objemu, ktorý vyrovnáva zmeny objemu vody pri zmene výkonu reaktora a súčasne udržiava tlak chladiacej vody v primárnom okruhu na konštantnej hodnote.

1.2. Sekundárny okruh jadrovej elektrárne

Sekundárnym okruhom jadrovej elektrárne je systém zariadení, ktorý umožňuje premeniť tepelnú energiu pary v mechanickú energiu rotora parnej turbíny.

Základné zariadenia tohto okruhu:

- turbína a generátor
- kondenzátor
- kondenzačné a napájacie čerpadlo
- regeneračné ohrievače

V sekundárnom okruhu sa premieňa tepelná energia pary vyrobenej v parogenerátoroch na elektrickú. Para z parogenerátora prúdi do turbíny, ktorá má vysokotlakovú časť a nízkotlakovú časť. Expanzia tlakovej pary medzi lopatkami rotora turbíny spôsobuje jeho točenie. K premene pohybovej energie na elektrickú dochádza v generátore, ktorého rotor je pevne spojený s rotorom turbíny. Po expanzii pary v nízkotlakovej časti a znížení teploty v turbíne sa v kondenzátoroch para mení na vodu. Chladenie kondenzátorov, v ktorých je para odnímaná jej už nevyužitelná energia, zaisťuje tretí, tzv. cirkulačný chladiaci okruh elektrárne. Jeho najväčšiu časť tvoria chladiace veže, kde sa voda zohriata v kondenzátoroch ochladzuje. Kondenzát vznikajúci z pary je vedený späť do parogenerátora, kde sa znovu mení na paru a prúdi do turbíny. Cyklus v sekundárnom okruhu sa týmto uzatvára.

K technologickým systémom strojovne patrí:

- Rozvod pary
- Parná turbína
- Pomocné systémy parnej turbíny
- Systém kondenzácie
- Nízkotlaká regenerácia

- Tepelná úprava vody a systém pomocných nádrží
- Napájanie parogenerátora
- Vysokotlaká regenerácia
- Systém dochladzovania primárneho okruhu

Tieto systémy sekundárneho okruhu zaisťujú:

- Preberanie a transport energie z primárneho okruhu do parnej turbíny
- Premena tepelnej a tlakovej energie na energiu mechanickú, za predpokladu čo najvyššej účinnosti, bezpečnosti
- Postupný ohrev, chemická úprava a transport do PG

Úlohy sekundárneho okruhu:

- Zaistenie vysokej účinnosti premeny tepelnej energie
- Zaistenie dochladzovania bloku pri jeho plánovanom, ale aj havarijnom odstavení
- Vyvedenie časti tepelnej energie pre vytápanie objektov JE
- Zaistenie dopravy surovej vody na území elektrárne a jej skladovanie
- Zaistenie výroby elektrickej energie nezávislým zdrojom pre bezpečné odstavovanie reaktorového bloku v nenominálnych režimoch
- Odvod nízko potenciálnej tepelnej energie z kondenzátora parných turbín a ďalších zariadení do atmosféry
- Zaistenie výroby, skladovanie a rozvod nízkotlakého a vysokotlakého vzduchu
- Zaistenie bezpečného skladovania a distribúcie technických plynov nutných pri výrobe elektrickej energie JE.
- Zaistenie odvodu tepla z vybraných zariadení primárneho okruhu a sekundárneho okruhu pomocou špeciálnych chladiacich okruhov
- Zaistenie využitia energetického potenciálu odpadných vôd k výrobe elektrickej energie
- Zaistenie zberu a odvodu odpadných vôd z elektrárne. [8]

1.3. Vodné hospodárstvo

Technológia jadrovej elektrárne spotrebuje veľké množstvo vody. Vodné hospodárstvo zaisťuje prívod surovej vody potrubiami z vyrovnávacej nádrže cez vyrovnávací vodojem do elektrárne. Prebieha úprava vody na požadovanú kvalitu. Vodojem a čerpacia stanica je chránená pred vodným rázom. Po úprave sa chladiaca voda

pripravuje do cirkulačného chladiaceho okruhu. Odtiaľ smeruje do cirkulačnej čerpacej stanice, kde čerpadla zaisťujú obeh chladiacej vody z kondenzátorov do chladiacich veží a späť. Chemická úprava vody prebieha v špeciálnom stredisku, kde sa pripravuje demineralizovaná voda pre dopĺňovanie primárneho a sekundárneho okruhu, taktiež ostatných zariadení. Systém kanalizácie zabezpečuje zhromažďovanie odpadných vôd, čistenie, kontrolu a vypúšťanie.

Podstatná časť privedenej vody sa spotrebuje na doplnenie stratenej vody do okruhu jadrovej elektrárne. Straty sú v podstate závislé na výkone bloku, počasí a ročnom období. Rozoznávame 4 druhy strát:

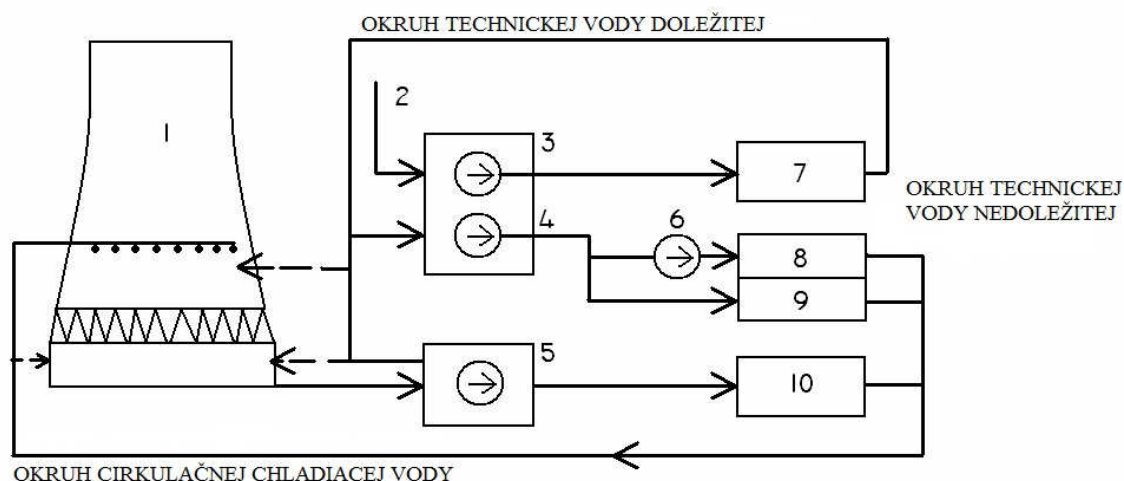
- Podľa druhu vody
- Podľa spôsobu vzniku
- Podľa spôsobu odvodu vody
- Podľa zariadenia z ktorého sa strata stráca

Napr. najvyššie hodinové straty vody sa pri prevádzke štyroch blokov uvádzajú, odparovanie z chladiacich veží, úlet z chladiacich veží, strata do kanalizácie z odluhu cirkulačnej chladiacej vody, z chemickej prevádzky, straty z primárneho a sekundárneho okruhu. Celková strata v lete je približne $9000 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$, v zime sú približne polovičné. [8]

Vonkajší chladiaci okruh

Prebytočnú tepelnú energiu z vnútorných chladiacich okruhov predávajú výmenníky do cirkulačného chladiaceho okruhu, ktorý ich odvádza do atmosféry.

Obr.1.1 Blokové schéma vonkajších chladiacich okruhov VVER 440, [8]



1 – chladiaca vež, 2 – prívod prídavnej vody, 3 – tri čerpace stanice TVD, 4 – čerpace stanice TVN, 5 – čerpace stanice CCHV, 6 – zvyšovacie čerpadlo TVN, 7 – spotrebiče technickej vody dôležitej, 8 – vybrané spotrebiče technickej vody nedôležitej, 9 – spotrebiče technickej vody nedôležitej, 10 – spotrebiče cirkulačnej chladiacej vody.

1.4 Odpadné teplo

Odpadné teplo je teplo viazané na odchádzajúce plynné, pevné alebo kvapalné látky technologickej či energetickej povahy. Vo veľkom množstve vzniká v priemysle, energetike, pri výrobe stavebných hmôt i menších prevádzkach.

Možnosti využitia:

Dodávka tepla je pre jednotlivé technológie nenahraditeľná, avšak veľká časť behom procesov uniká, alebo sa odvádza na konci práve ako odpad. Odpadné teplo sa dá vhodnou formou vracať späť do procesu, využívať v inej oblasti alebo prevádzať na ďalšiu formu energie.

Možnosti využitia odpadného tepla sú obmedzené taktiež tým, či je dodávka tepla stála, kolísava alebo je prerušovaná. Rozoznávame dva druhy tepiel a to vysokopotenciálne a nízkopotenčníálne. Vysokopotenciálne teplo, teplo o vysokej teplote sa obvykle využíva priamo v technológiách, napr. v energetike (systémy regeneračných stupňov a medzi prihrievanie napájané odberovou parou z turbíny).

Nízkopotenčníálne teplo sa najčastejšie využíva k vytápaniu a na prípravu teplej vody v priestoroch súvisiacich s prevádzkou (dielne, sklady, továrne). Rozhodnutie o spôsobe vytápania sústavy závisí na teplote vstupného média. Ak je možné odpadným teplom cez jednoduché výmenníky topnú kvapalinu ohriať na 60 °C, ide použiť bežný topný systém s vodnými radiátormi. Ak by dosažiteľná teplota bola nižšia, je možné použiť podlahové vytápanie či tepelné čerpadlo. [10]

Zariadenia na predávanie tepla

Medzi tieto zariadenia patria napr.:

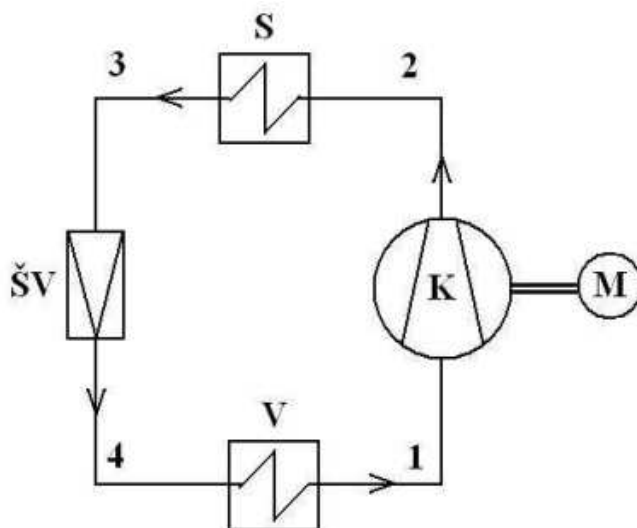
- Tepelný výmenník
- Tepelné čerpadlo

Návrhom NTO sa budem podrobnejšie venovať v nasledujúcich kapitolách.

Tepelné čerpadlo:

Alternatívny zdroj energie, umožňuje brať teplo z okolného prostredia (voda, vzduch, zem), prevádzať ho na vyššiu teplotnú hladinu a následne účelne využiť pre vytápanie alebo prípravu teplej vody. Pre prečerpávanie tepla na vyššiu teplotnú hladinu, taktiež prevádzka tepelného čerpadla konzumuje určité množstvo energie. To znamená, že TČ spotrebováva pre pohon kompresoru elektrickú energiu. Množstvo tejto energie nie je zanedbateľné, preto môžeme TČ považovať za alternatívny zdroj tepla iba čiastočne. Skladá sa z dvoch častí a to vonkajšej a vnútornej. Vonkajšia časť odoberá teplo zvoleného prostredia (voda, vzduch) a prenáša ho k vnútornej časti, ktorá zaisťuje zvýšenie teploty a účelné využitie získaného tepla. Konštrukčne aj funkčne sa TČ podobá chladiacemu zariadeniu s uzavretým obehom pracovnej látky.

Obr. 1.2 Schéma tepelného čerpadla, [9]



K – kompresor, M – pohon kompresoru, S – kondenzátor, ŠV – škrtiaci ventil, V – výparník

Výparník V odoberá zdroju teplo a nízkej teplote. Získané teplo sa viaže na pracovnú látku, ktorá sa tým odparuje. Para stlačuje kompresor K na vysoký tlak, para v kondenzátore skvapalnie a odovzdá do okolia teplo o vyššej teplote. Z kondenzátora je kvapalina vedená do škrtiaceho ventilu ŠV, kde škrtением zníži svoj tlak a vracia sa späť do výparníka.

2. Výpočet parametrov sekundárneho okruhu elektrárne

Účelom výpočtu je určenie jednotlivých parametrov sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440 MW. Jadrová elektráreň má tlakovodný reaktor, ktorý predáva teplo tlakovej vode primárneho okruhu. V sekundárnom okruhu je jedna kondenzačná turbína na sýtu paru. Medzi stredotlakovou a nízkotlakovou časťou je prevedené odlúčenie vlhkosti s nasledujúcim prehriatím admisnej pary. Ohrev napájacej vody odberovou parou prebieha v 6 ohrievačoch. [8], [31].

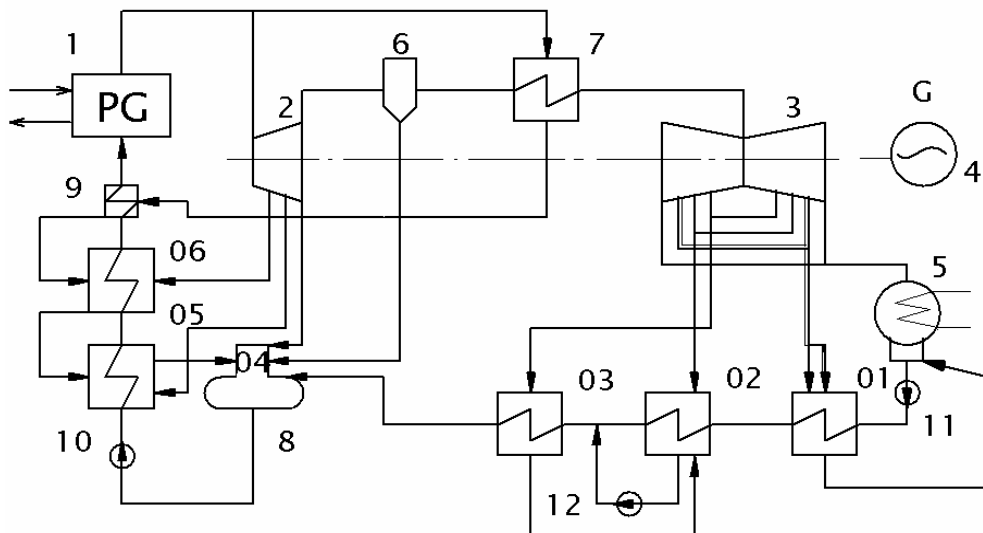
Výpočet:

1. Výpočet expanzie pary v turbíne
2. Výpočet ohrievania napájacej vody
3. Výpočet účinnosti navrhutej elektrárne

Predpoklady:

Vychádzam zo zjednodušenej tepelnej schémy sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440. Príloha [A]

Obr. 2.1. Tepelné schéma sekundárneho okruhu elektrárne



1 – parný generátor, 2 – stredotlaková časť parnej turbíny, 3 – nízkotlaková časť parnej turbíny, 4 – elektrický generátor, 5 – kondenzátor, 6 – odlučovač vlhkosti, 7 – prihrievač, 01 – 02 – 03 - 04 - 05 – 06 – ohrievače napájacej vody, 8 – odplyňovač, 9 – chladič kondenzátu, 10 – napájacie čerpadlo, 11 – kondenzačné čerpadlo, 12 – prečerpávacie čerpadlo .

- Odpad z parného generátora je 1 %.
- Tepelné straty zanedbávam.
- Tlaková strata medzi parným generátorom a turbínou je 2,5 % z ppg.
- Strata na regulačných ventiloch turbíny je $12,5 \text{ kJ kg}^{-1}$.
- V odlučovači vlhkosti sa vlhkosť odlúči až na hornú medznú krivku.
- K prihrievaniu pary za stredotlakovým dielom je použitých 6 % admisnej pary.
- Tlaková strata v odlučovači vlhkosti, prehrievači pary a v spojovacom potrubí je 15 % z pel.
- Behom expanzie sa v nízkotlakovom diele predpokladá jedno odlúčenie 3 % vlhkosti
- Strata výstupnej rýchlosti pary z turbíny je $\Delta i_z = 30 \text{ kJ kg}^{-1}$.
- Tlak v kondenzátore turbíny je 3,92 kPa, entalpia kondenzátu $i_o = 119,9 \text{ kJ kg}^{-1}$.
- Straty z upchania sú zanedbateľné.
- Mechanická a elektrická účinnosť turbogenerátora je $\eta_{me} = 0,983$.
- Koncový rozdiel teplôt v nízkotlakových regeneračných ohrievačoch je 2° C , v stredotlakových je 3° C .
- Tlaková strata medzi turbínou a regeneračnými ohrievačmi je 10 % z poj.
- Príkon obehových čerpadiel je zanedbateľný.

2.1 Výpočet expanzie páry v turbíne

Parný generátor vyrába sýtu paru o tlaku $p_{pg} = 5,89 \text{ MPa}$, ktorej prislúcha teplota sýtosti $274,3^\circ \text{ C}$. U parného generátora bez ekonomizéra je minimálny teplotný rozdiel určený rozdielom teplôt sýtej pary a primárneho chladivá na výstupe z parného generátora, takže $\Delta t_{\min} = 18,7^\circ \text{ C}$.

Tlak pred turbínou $p_{a1} = 0,975 p_{pg} = 5,74 \text{ MPa}$. Priebeh expanzie v turbíne je znázornený na obr. 2.3. Tlak za stredotlakovým dielom je v danom prípade určený tlakom v odplyňovači, kde teplote 165° C odpovedá $p_s = 0,701 \text{ MPa}$.

Odpovedajúci odberový tlak je $p_0 = p_{e1} = 0,77 \text{ MPa}$. Určením expanznej čiary stredotlakového dielu ide získať ostatné parametre (obr. 2.3), [31].

$$i_{a1} = 2784,5 \text{ kJ.kg}^{-1}, \quad 1 - x_{\text{vysť}} = 12,5\%, \quad \eta_{ST} = 0,797, \quad \Delta i_{ST} = 280,5 \text{ kJ.kg}^{-1},$$

$$i_{e1} = 2504 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

V separátore sa odlučuje 12,5 % vody (na hornú medznú krivku). V prehrievači je k prehrievaniu použitej 6 % admisnej pary, čomu odpovedá $y_1 = 0,06$.

Z tepelnej bilancie prehrievača, vzťahujúca sa na 1 kg pary vystupujúcej z parného generátoru, plynie

$$(1 - y_1) \cdot (i_{a2} - i_{v7}) = y_1 (i_{a1} - i_{v7}) \quad (2.1)$$

$$(1 - 0,06) \cdot (i_{a2} - 2762,9) = 0,06 \cdot (2784,5 - 1200) \Rightarrow i_{a2} = 2870 \text{ [KJ.kg}^{-1}\text{]}$$

Kde $i_{v7} = 1200 \text{ kJ.kg}^{-1}$ je entalpia kondenzátu topnej pary.

Odtiaľ $i_{a2} = 2870 \text{ kJ.kg}^{-1}$ a pri $p_{a2} = 0,67 \text{ MPa}$ je $t_{a2} = 211^\circ \text{C}$ (obr. 2.3). Hodnoty odberových tlakov sú určené teplotami t_{v1} až t_{v5} navrhnutej tepelnej schémy. Na základe uvedených predpokladov a odčítaní z i – s diagramu bola zostavená výsledná tab. 2.1.

Tab.2.1. Výpočtová tabuľka ohrievania napájacej vody

Veličina	Označenie	Rozmer	Ohrievač					
			01	02	03	04	05	06
Teplota za ohrievačom	t_{vj}	$^\circ\text{C}$	70	100	130	165	195	225
Entalpie za ohrievačom	i_j	kJ.kg^{-1}	293,8	419,6	546,6	697,3	833,0	968,4
Teplota sýtosti odberovej pary	t_{sj}	$^\circ\text{C}$	72	102	132	165	198	228
Odpovedajúci Tlak	p_{sj}	MPa	0,034	0,109	0,278	0,701	1,491	2,697
Odpovedajúce entalpie	i_{sj}	kJ.kg^{-1}	301,4	427,5	554,8	697,3	843,4	980,9
Odberový tlak	p_{oj}	MPa	0,037	0,120	0,316	0,772	1,640	2,970
Entalpie v mieste odberu	i_{oj}	kJ.kg^{-1}	2447	2607	2748	2504	2608	2695

Teplota za ohrievačom (t_{vj}) je daná meraním. Entalpie za ohrievačom (i_j) som určil z tabuliek z termomechaniky [5]. Teplota sýtosti odberovej pary (t_{sj}) je daná koncovým rozdielom teplôt v nízkotlakových a stredotlakových regeneračných ohrievačoch. (základné charakteristiky)

Odpovedajúci tlak (p_{sj}), [5] v závislosti na teplote a entalpií za ohrievačom. Odpovedajúce entalpie (i_{sj}), [5] na základe teploty sýtosti odberovej pary. [31].

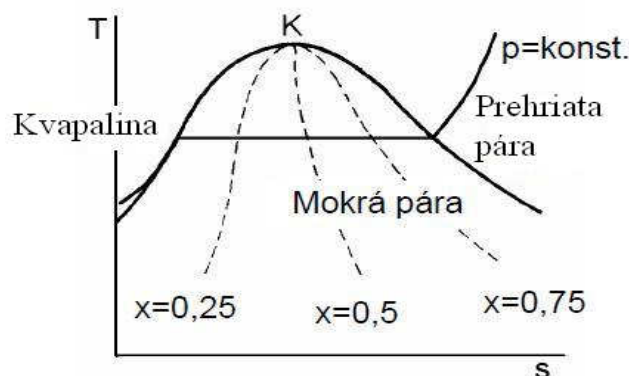
Odberový tlak (p_{oj}) predstavuje tlakovú stratu medzi turbínou a regeneračnými ohrievačmi. Entalpie v mieste odberu (i_{oj}) na základe entalpie mokrej pary:

$$i_x = i' + x \cdot (i'' - i') \Rightarrow i_x = 980,9 + 0,94(2804 - 980,9) = 2695 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (2.2)$$

kde x je suchosť, predstavuje hodnotu 0,94 z obr. 2.3.

Príklad výpočtu uvádzam k ohrievaču číslo 06 z tab. 2.1.

Obr. 2.2 Diagram mokrej pary, [5]



Pre určenie priebehu expanzie v nízko tlakom diele turbíny sa uvažuje jedno odlúčenie 3 % vlhkosti pri tlaku 37 kPa. Tým sa dosiahne to, že výstupná vlhkosť s turbíny neprevýši prípustnú hodnotu.

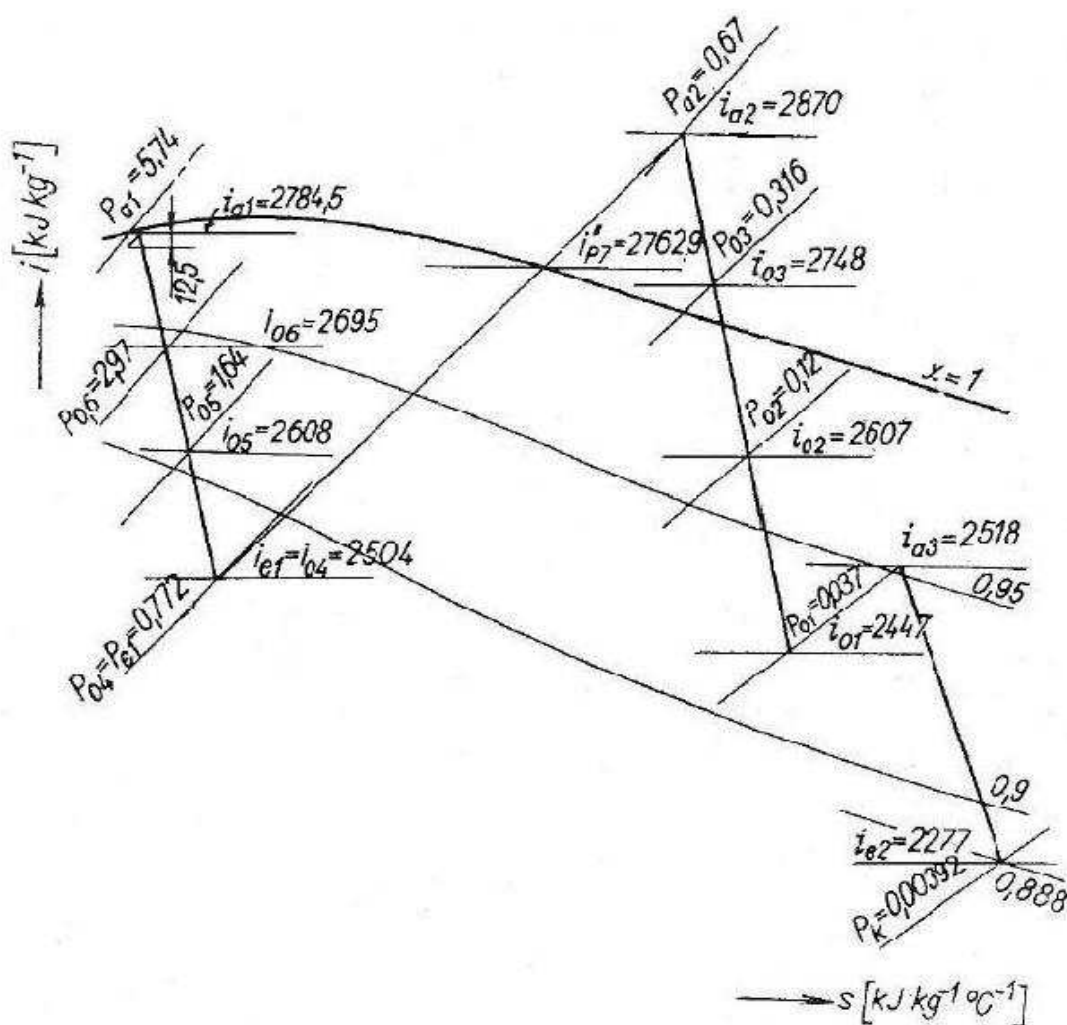
Vnútoraná termodynamická účinnosť časti pred odlúčením vlhkosti je

$$\eta_{NT1} = 0,853, \text{ príslušný spád } \Delta i_{N1} = 423 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

V časti po odlúčení vlhkosti je

$$\eta_{NT2} = 0,813 \text{ príslušný spád } \Delta i_{N2} = 241 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Obr. 2.3 Priebeh expanzie pary v parnej turbíne (hodnoty tlakov v MPa), [1]



2.2. Výpočet ohrievania napájacej vody

Do chladiča kondenzátu prehrievača ide relatívne množstvo $y_1 = 0,06$. Predpokladá sa jeho zaškrtenie na tlak odpovedajúci teplote $t_{ch} = 231^\circ C$, takže $i_{ch} = 995 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Chladič kondenzátu:

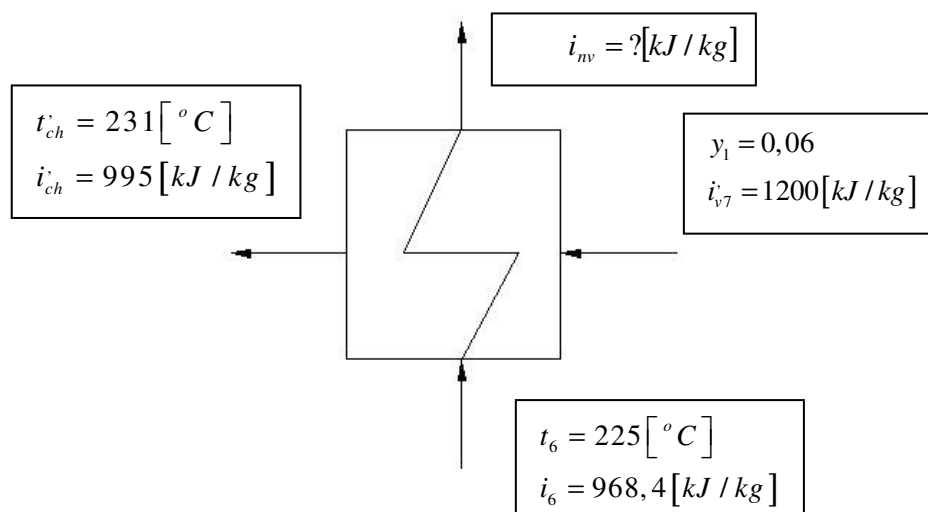
Z rovnice tepelnej bilancie si určíme i_{nv}

$$1,01(i_{nv} - i_6) = y_1(i_{v7} - i_{ch}) \quad (2.3)$$

$$1,01(i_{nv} - 968,4) = 0,06(1200 - 995) \Rightarrow i_{nv} = 980,6 [\text{kJ.kg}^{-1}]$$

Určil som $i_{nv} = 980,6 \text{ kJ.kg}^{-1}$ čomu odpovedá $t_{nv} = 228^\circ C$

Obr. 2.2.1 Chladič kondenzátu

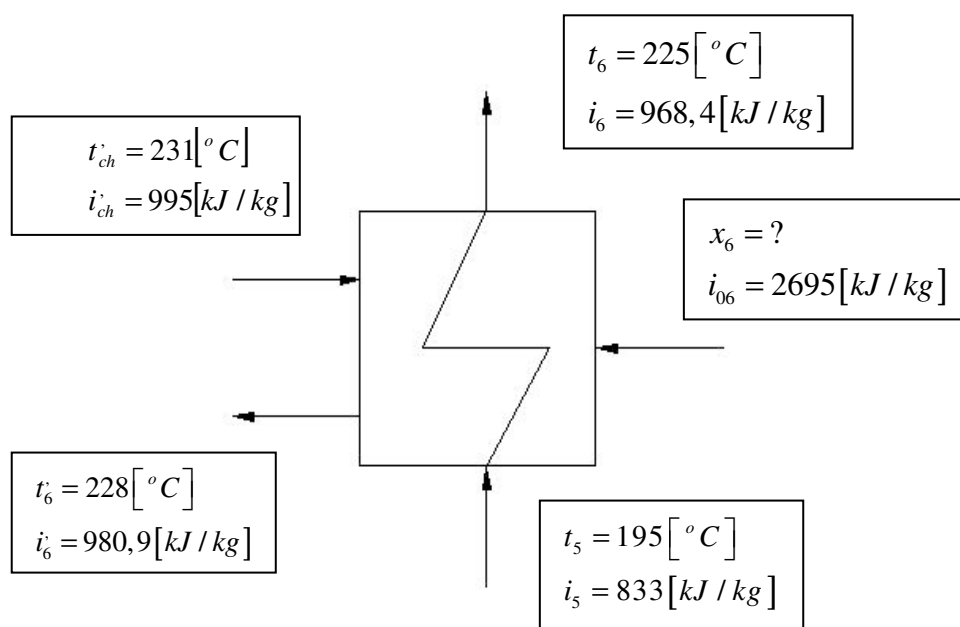


Ohrievač 06:

$$1,01(i_6 - i_5) = x_6(i_{06} - i_6') + y_1(i_{ch} - i_6') \quad (2.4)$$

$$1,01(968,4 - 833) = x_6(2695 - 980,9) + 0,06(995 - 980,9) \Rightarrow x_6 = 0,0793$$

Obr.2.2.2 Ohrievač 06

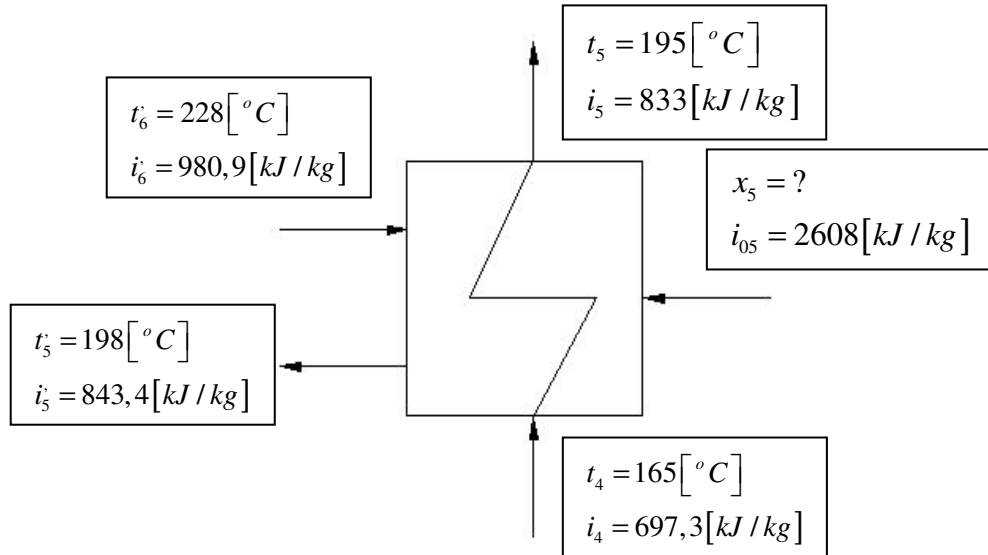


Ohrievač 05:

$$1,01(i_5 - i_4) = x_5(i_{05} - i_5) + (x_6 + y_1)(i_6 - i_5) \quad (2.5)$$

$$1,01(833 - 697,3) = x_5(2608 - 843,4) + (0,0793 + 0,06) \cdot (980,9 - 843,4) \Rightarrow x_5 = 0,066$$

Obr. 2.2.3 Ohrievač 05

**Ohrievač 04:**

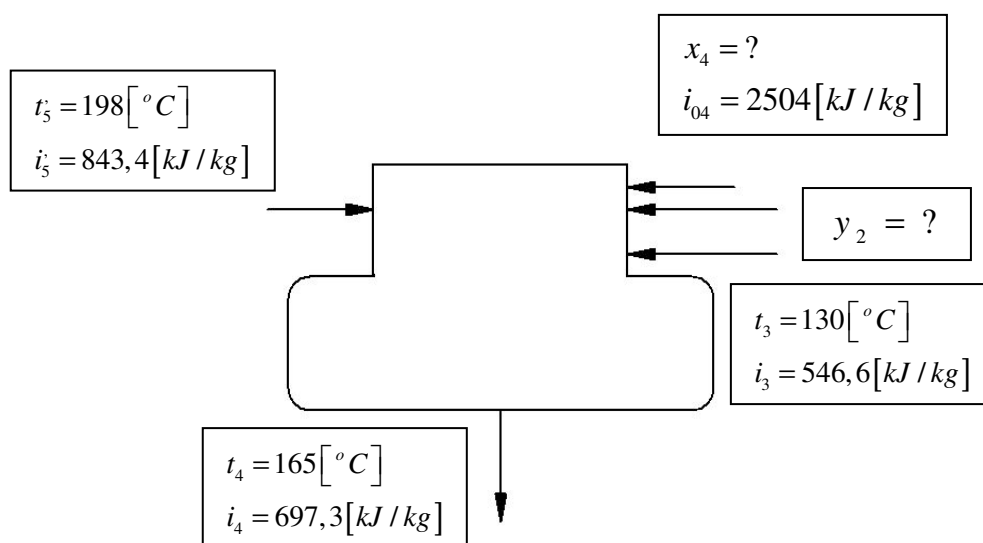
$$[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)](i_3 - i_2) = x_4(i_{04} - i_4) + (x_5 + x_6 + y_1)(i_5 - i_4) \quad (2.6)$$

Kde y_2 je množstvo odlúčenej vody za stredotlakým dielom turbíny a pri odlúčení 12,5 % vlhkosti sa rovná :

$$y_2 = 0,125[1 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1)] \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} & \{[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + 0,125[1 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1)])]\}(i_3 - i_2) = x_4(i_{04} - i_4) + (x_5 + x_6 + y_1)(i_5 - i_4) \\ & \left\{ \left[1,01 - (x_4 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,125 \cdot [1 - (x_4 + 0,066 + 0,0793 + 0,06)]) \right] \right\} \cdot (546,6 - 419,6) = \\ & = x_4(2504 - 697,3) + (0,066 + 0,0793 + 0,06) \cdot (843,4 - 697,3) \Rightarrow x_4 = 0,0352 \end{aligned}$$

Obr. 2.2.4 Ohrievač 04



Rovnicu (7) som dosadil do rovnice (6) aby som mohol určiť relatívne množstvo odberovej pary pre ohrievač 04, následne som dopočítal relatívne množstvo kondenzátu y_2

$$y_2 = 0,125[1 - (0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06)] \Rightarrow y_2 = 0,0949$$

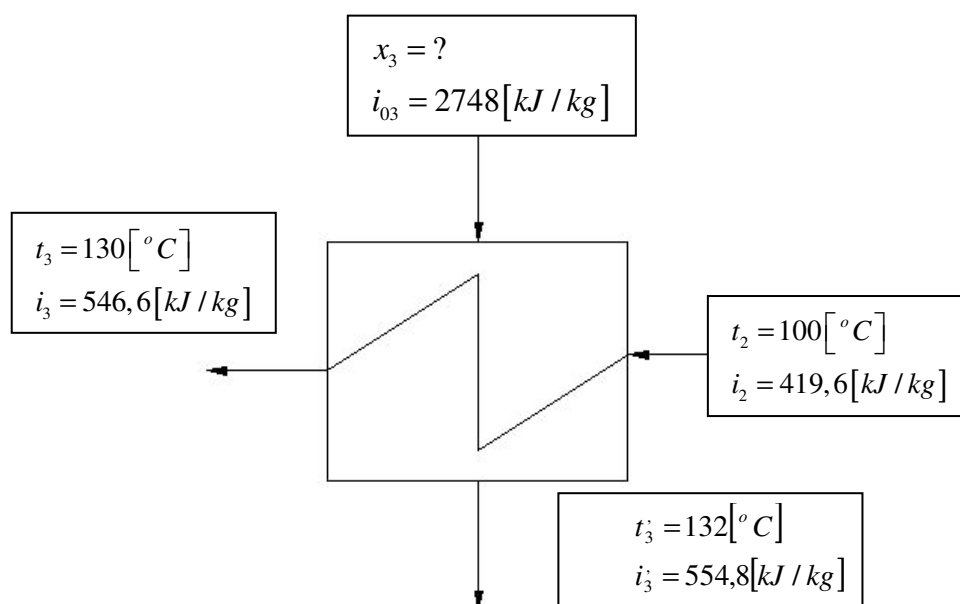
Ohrievač 03:

$$[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)](i_3 - i_2) = x_3(i_{03} - i_3) \quad (2.8)$$

$$[1,01 - (0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)](546,6 - 419,6) = x_3(2748 - 554,8)$$

$$x_3 = 0,0391$$

Obr. 2.2.5 Ohrievač 03

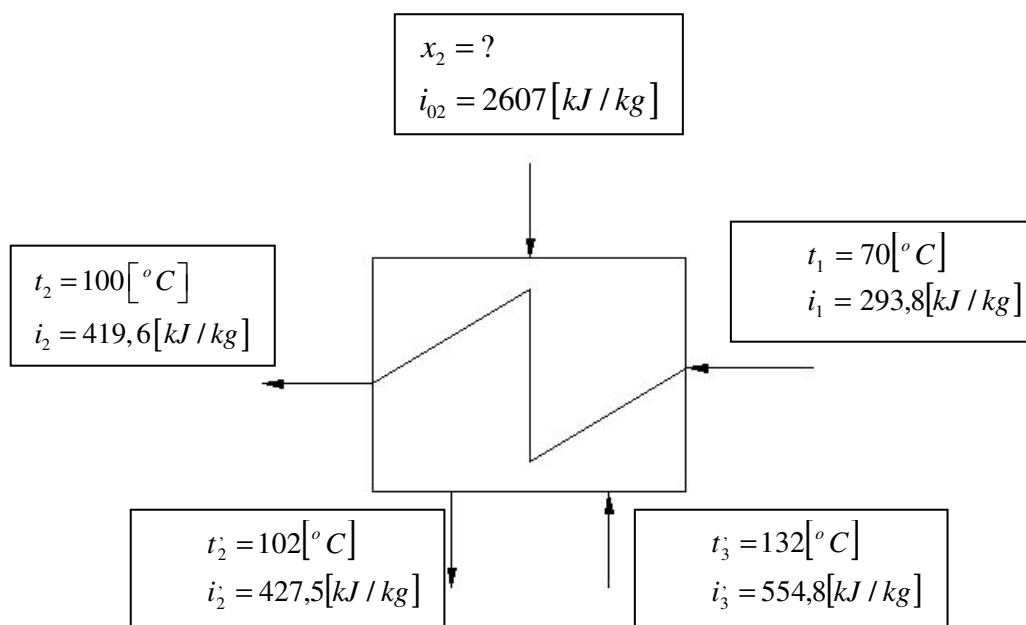


Ohrievač 02:

$$\left[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)\right] \cdot (i_2 - i_1) = x_2 (i_{02} - i_2) + x_3 (i_3 - i_2) \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & \left[1,01 - (0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)\right] \cdot (419,6 - 293,8) = \\ & = x_2 (2607 - 419,6) + 0,0391 (554,8 - 419,6) \Rightarrow x_2 = 0,0364 \end{aligned}$$

Obr. 2.2.6 Ohrievač 02

**Ohrievač 01:**

$$\left[1,01 - (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)\right] \cdot (i_1 - i_0) = x_1 (i_{01} - i_1) \quad (2.10)$$

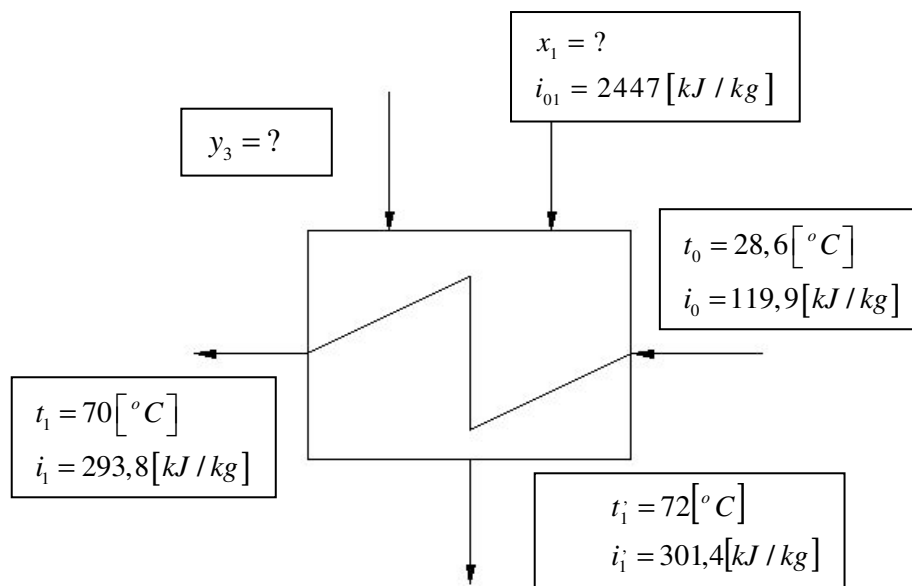
$$\begin{aligned} & \left[1,01 - (0,0364 + 0,0391 + 0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)\right] \cdot (293,8 - 119,9) = \\ & = x_1 (2447 - 301,4) \Rightarrow x_1 = 0,0486 \end{aligned}$$

Odlúčenie 3 % vlhkosti v nízko tlakom diele znamená relatívne množstvo

$$y_3 = 0,03 \left[1 - (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)\right] \quad (2.11)$$

$$y_3 = 0,03 \left[1 - (0,0364 + 0,0391 + 0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)\right] \Rightarrow y_3 = 0,0177$$

Obr. 2.2.7 Ohrievač 01



Pri výpočte ohrievania napájacej vody som vychádzal z tab. 2.1. Výsledky získané postupným riešením uvedených vzťahov a odčítaním spadov v $i - s$ diagrame sú uvedené v tab. 2.2.

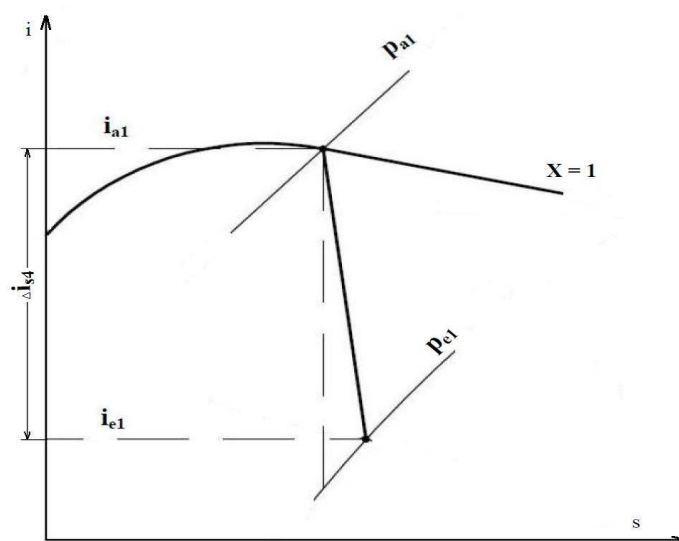
Tab.2.2 Výsledky výpočtov odberových množstiev pre ohrev napájacej vody

Veličina	Rozmer	Odber			
		x_1	x_2	x_3	x_4
Množstvo	$[-]$	0,0486	0,0364	0,0391	0,0352
Užitočný spád	$kJ.kg^{-1}$	703,5	543,5	402,5	280,5

Veličina	Rozmer	Odber				
		x_5	x_6	y_1	y_2	y_3
Množstvo	$[-]$	0,0660	0,0713	0,060	0,0949	0,0177
Užitočný spád	$kJ.kg^{-1}$	176	89,5	0	280,5	704,5

Užitočný spád som prepočítaval nasledovne:

Obr. 2.4 Užitočný spád



$$\Delta i_{s4} = i_{a1} - i_{e1} = 2784,5 - 2504 = 280,5 [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (2.12)$$

Príklad výpočtu uvádzam pre odber x_4 z tab.2.2

2.3. Výpočet účinnosti navrhutej elektrárne

Účinnosť bude v tomto prípade závislá na:

- množstve vyrobenej pary
- výkone parnej turbíny
- vnútornej tepelnej účinnosti parného cyklu
- výkonu elektrárne na svorkách elektrického generátora
- tepelnej účinnosti parného obehu vzhľadom na svorky elektrického generátoru
- čistom výkone elektrárne

Zadané:

Výkon parného generátora	$P_R = 3010$	$[MW]$
Výkon parnej turbíny	$P_T = 1015$	$[MW]$
Merná entalpia na vstupe 1 dielu turbíny	$i_{a1} = 2784,5$	$[kJ.kg^{-1}]$
Merná entalpia napájacej vody	$i_{NV} = 980,6$	$[kJ.kg^{-1}]$
Relatívna vlastná spotreba elektrárne	$\varphi_{CV} = 0,05$	$[-]$
Mechanická a elektrická účinnosť turbogenerátora	$\eta_{me} = 0,983$	$[-]$

Ak neuvažujeme nad tepelnými stratami v elektrárne, tak množstvo pary vyrábané v parnom generátore je:

$$Q_{mp} = \frac{P_R}{i_{a1} - i_{NV}} = \frac{3010 \cdot 10^3}{2784,5 - 980,6} = 1668,6 [kg.s^{-1}] \quad (2.13)$$

Vnútna tepelná účinnosť parného cyklu:

Obecne je vnútorná tepelná účinnosť parného obehu daná pomerom práce (alebo výkonu) parnej turbíny k množstvu tepla (alebo výkonu), predaného v parnom generátore pracovnej látke.

$$\eta_{ti} = \frac{P_T}{P_G} = \frac{1015}{3010} = 0,337 \quad (2.14)$$

Výkon elektrárne na svorkách elektrického generátora:

$$P_E = P_T \cdot \eta_{me} = 1015 \cdot 0,983 = 997,75 [MW] \quad (2.15)$$

Tepelná účinnosť cyklu vzhľadom na svorky elektrického generátoru:

$$\eta_{te} = \eta_{ti} \cdot \eta_{me} = 0,337 \cdot 0,983 = 0,3313 \quad (2.16)$$

Čistý výkon elektrárne:

$$P_N = P_E \cdot (1 - \varphi_{CV}) = 997,75 \cdot 0,95 = 947,63 [MW] \quad (2.17)$$

Čistá účinnosť:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_R} = \frac{947,63}{3010} = 0,315 \quad (2.18)$$

Pri zvyšovaní čistej účinnosti jadrovej elektrárne je nutné znižovať tepelné, mechanické a elektrické straty zariadení, znižovať príkony potrebné pre cirkuláciu chladiva a pracovnej látky, predovšetkým zvyšovať vnútornú účinnosť parného obehu η_{ii} .

Na rozdiel od klasických tepelných elektrární, kde obmedzenie parametrov vyrobenej pary je dané vlastnosťami materiálu použitých pri výrobe ich zariadení, u jadrových elektrární sú parametre pary obmedzené palivom, jeho pokrytím a v niektorých prípadoch aj chladivom. Vo väčšine prípadoch sú zatiaľ u jadrových elektrární parametre pary nižšie.

Pre zvyšovanie tepelnej účinnosti parného obehu je možno u jadrových elektrární použiť okrem klasických spôsobov ohrievania kondenzátu a prihrievania pary ešte aj zníženie nevratnosti pri prenose tepla z chladiva do pracovnej látky v parnom generátore.

Pri ohrievaní kondenzátu odberovou parou sa v praxi používa maximálne 6 až 7 ohrievacích stupňov, pričom ohriatie napájacej vody v jednom ohrievači sa volí v rozmedzí 25 až 35 °C. Stanovenie optimálnej teploty napájacej vody a počtu regeneračných ohrievačov je zložitou technicko-ekonomickou otázkou.

Tieto hodnoty majú totiž vplyv na účinnosť celého parného obehu, parametre chladiva v okruhu reaktora, konštrukciu a investičné náklady parného generátora, reaktora, parnej turbíny a nakoniec aj systému ohrievania napájacej vody. [1], [31].

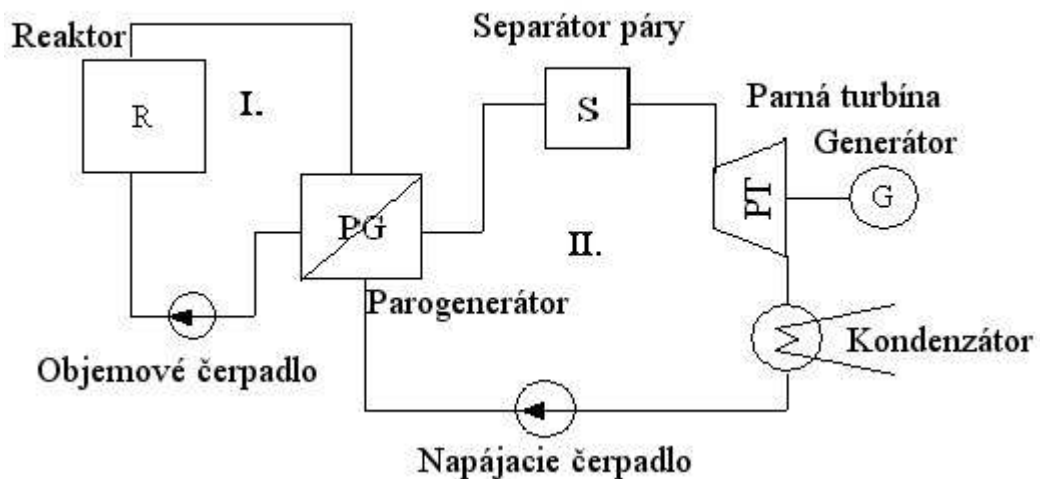
Prihrievanie pary ma dva kladné vplyvy:

- zvýšenie tepelnej účinnosti parného obehu
- zníženie vlhkosti pary v koncových stupňoch turbíny a eventuálne prejsť na vyšší tlak vstupnej pary.

3. Využitie projektových rezerv VVER 440

Ide o využitie výkonovej rezervy bloku VVER 440, reaktora typu 213 a následne prenesenie tohto zvýšeného výkonu do elektrickej sústavy. Nominálny projektovaný tepelný výkon reaktora je 1375 MWt/blok. Tomu odpovedá elektrický výkon 440 MWe/blok. Rekonštrukciou nízkotlakých (NT) časti turbín za pomoci zlepšenia ich termodynamických účinnosti dôjde k zvýšeniu elektrického výkonu bloku na 455,5 MWe/blok. [11]

Obr. 3.1 Zjednodušené schéma VVER 440, [7]



Ak pominem terciálny chladiaci okruh, technologické schéma bloku je dvojokruhové.

Primárny okruh (I) zahrňuje reaktor a šesť cirkulačných slučiek. Medzi hlavné komponenty patrí parogenerátor, hlavné cirkulačné čerpadlo, uzavieracie armatúry a spojovacie potrubie.

Sekundárny okruh (II) zahrňuje sekundárnu časť parogenerátora, turboagregáty a pomocné zariadenia strojovne.

3.1. Technické oblasti

Problematika týchto rezerv je zameraná na tieto technické oblasti:

- Zvýšenie termodynamickej účinnosti turbín
- Zvýšenie tepelného výkonu reaktora

Spočíva v analýze jednotlivých zariadení, posúdenie možnosti zvýšenia tepelného výkonu reaktora (0-10%) a návrhy nutných úprav jednotlivých technologických celkov.

Tento zámer predpokladá zvýšenie tepelného výkonu reaktora o 5% voči súčasnej nominálnej hodnote 100%, čo predstavuje zvýšenie tepelného výkonu z 1375 MWt na 1444 MWt. Spoločne so zvýšením účinnosti tepelného cyklu (približne 5%) bude elektrický výkon jedného bloku približne 500 MWe, čo pre 4 bloky v podstate znamená elektrický výkon 2000 MWe.

3.1.1. Zmeny na vybraných systémoch a zariadeniach:

Primárny okruh:

- Reaktor s palivom vyššieho obohatenia

Sekundárny okruh:

- Modernizácia vysokotlakých dielov parných turbín
- Výmena prietokových častí NT dielu
- Úprava statoru generátora
- Náhrada meracích dýz a VT odlučovačov na parovodoch
- Zámena materiálu trúbok kondenzátora
- Zvýšenie hĺbkosti prepúšťacích staníc do kondenzátora turbín
- Úpravy regulácie hladín v kondenzátoroch a v napájacích nádržiach pre nové chovanie bloku

Elektrická časť:

- Modernizácia blokových transformátorov
- Úpravy monitorovacieho systému transformátoru
- Rekonštrukcia vyvedenia výkonu generátora

Systém kontroly a riadenia:

- Zmeny v nastaveniach
- Upgrade systému monitorovania stavu aktívnej zóny (SCORPIO – VVER)

3.2. Úpravy technologických zariadení v rámci projektových rezerv

3.2.1. Reaktor s palivom vyššieho obohatenia

Reaktor, zariadenie predstavujúce komplex systémov a prvkov určených k transformácii jadrovej energie na energiu tepelnú.

Ako som už spomínal ide o tlakovodný heterogénny reaktor VVER 440, typ V 213, nominálny tepelný výkon 1375 MWt. Moderátor a chladivo zároveň tvorí demineralizovaná voda obsahom kyseliny bórtej H_3BO_3 0–12 g/kg H_2O . 312 ks. palivových kaziet s priemerným obohatením 2,5 %, 37 absorpčných tyčí.

Zámer – zvýšenie výkonu reaktora o 5 % na tepelný výkon 1444 MWt, bez konštrukčných zmien. Toto je možné dosiahnuť pomocou paliva s vyšším obohatením (typ Gd – 2M). Palivo zachováva 5 ročný cyklus, čo znamená, že nebude potreba vozit' alebo odvážať z reaktora viac kaziet. Nová kazeta bude väčšia a objemnejšia, taktiež rozoberateľná, operatívne kontrolovateľná, poprípade bude možné vymeniť niektorý element. Pokročilé palivo so zlepšenou konštrukciou a s nižším obohatením umožní (pri zachovaní výkonnosti kazety) ďalšie zníženie stredného obohatenia izotopom U235 z 4,38 na 4,25%. Tento nepatrný rozdiel v konečnom dôsledku výrazne zníži cenu paliva, na ktorú pripadá ¼ všetkých výrobných nákladov jadrových elektrární.

3.2.2. Modernizácia vysokotlakých dielov parných turbín

K 220 – 44, kondenzačná parná turbína na sýtu paru s jedným vysokotlakovým a dvoma nízkotlakovými dielmi mostovej konštrukcie. Každý nízkotlaký diel ma svoj vlastný kondenzátor. Pôvodná turbína dosahuje výkonu 220 MW, pracovné otáčky 3000 ot/min.

Vysokotlaké teleso je dvojprúdové, v každom prúde šesť stupňov. Vstup pary je riešený 4 hrdlami. Rozvádzacím zariadením parnej turbíny je okružný kanál, na ktorý tieto hrdla nadväzujú. Súčasťou tohto zariadenia sú rozvádzacie kolesá prvého stupňa uložené na krajoch okružného kanálu. Ostatné rozvádzacie kolesá sú uložené priamo na telese z dôvodu nízkej teploty admisnej pary (vstup do turbíny) spojené do skupín po dvoch. Rozvádzacie kolesá (2,3,5 a 6) sú vzájomne zošrubované. Podklad k tomu aby para neutekala, ale šla priamo na lopatky, taktiež aby sa zvýšil tesniaci tlak. Rozvádzacie kolesá sú vyrábané z nerezi. Vnútorňa časť je opatrená labyrintovým tesnením (ucpávka), ktoré zabráňuje skratovému prúdeniu páry štrbinou medzi kruhy rozvádzacích kôl a rotorom.

Zámer – najväčšia pozornosť kladená na účinnosť lopatkovania, ktorú je možno dosiahnuť použitím priestorových 3D rozvádzacích i obežných lopatiek všetkých stupňov. S cieľom čo najväčšej minimalizácie strát treba rátať s optimálne tvarovaným priestorom pre vstup pary do symetrického dvojprúdového vysokotlakého dielu. Výmena pôvodného rotora za rotor z materiálu 16 537 v rámci spojkových kotúčov s rovnakým počtom stupňov ako

v prípade pôvodného rotora. V prednom ložiskovom stojane uloženie rotora v pôvodnom reparovanom radiálnom ložisku, na strane NT dielu pevný bod rotorovej sústavy fixovaný kombinovaným radiálne – axiálnym ložiskom. Funkčné plochy deliacej roviny a drážok pre zasadenie rozvážacích kôl opatrit' nerezovými zvarmi. Vonkajší obal tvoria telesa z materiálu 42 2742, konštrukčne zhodné s pôvodnými.

Týmito zmenami dosiahnutie zvýšenej termodynamickkej účinnosti VT dielu turbíny z 75,85 % na 82,52 %, taktiež sa predlží projektovaná životnosť o viac než 200 000 prevádzkových hodín.

3.2.3. Výmena prietočných častí NT dielu

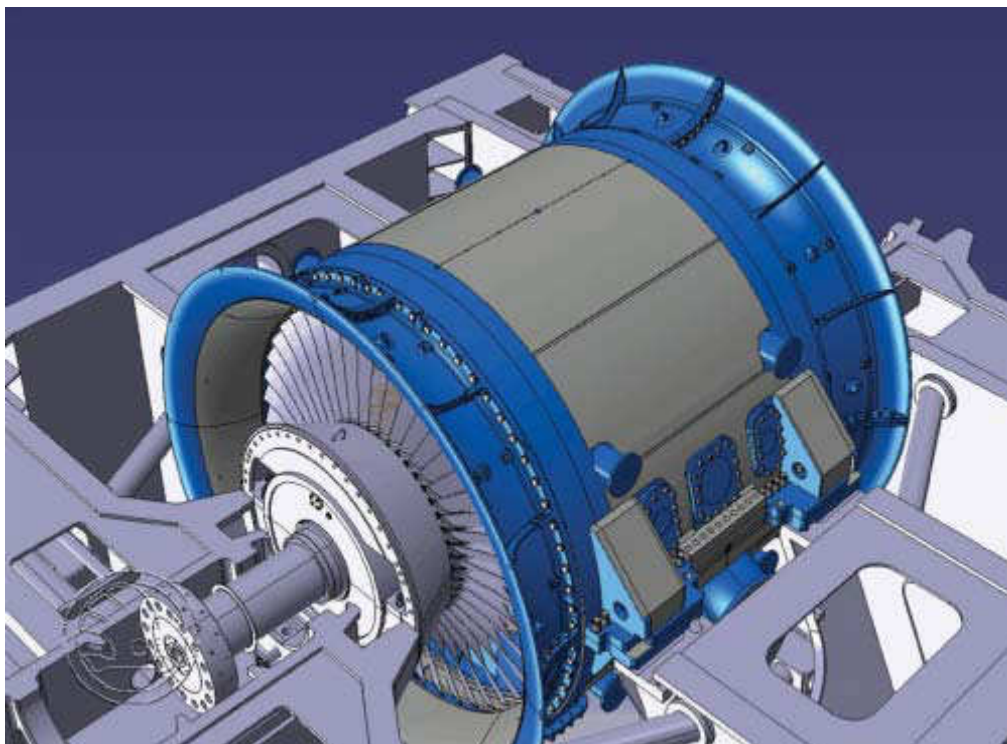
Parná turbína sa skladá z dvoch nízkotlakých dielov, ktoré môžeme rozdeliť na tri základné časti:

- Nízkotlaký rotor
- Nízkotlaké teleso
- Vonkajšie nízkotlaké ucpávky /tesnenia/

NT je dvojprúdové, v každom prúde je päť turbínových stupňov. Turbínový stupeň je tvorený rozvážacím kolom a obežným kolom. Obe telesa sú dvojskriňové. NU je prvok stroja, ktorý utesňuje vyvedenie pohyblivej súčasti hriadeľa medzi pracovným priestorom a atmosférou. Pôvodná životnosť 100 000 prevádzkových hodín.

Zámer – Rekonštrukcia zameraná na kompletnú výmenu dielov so zaistením vysokej spoľahlivosti a dosiahnutím zvýšeného výkonu turbíny. Ide o dodávku nových rotorov materiálu 16 537, nahradzujúce pôvodné konštrukčné riešenie. Rotory NT1 a NT2 identické, možná vzájomná zámena. Pre posledný stupeň, pracujúci v oblasti mokrej pary $x = 0,9$, použiť dutú rozvážaciu lopatku opatrenú drážkami na pretlakovej aj podtlakovej strane profilu pre odsávanie vodných kvapôčok z prúdiacej pary. Nové rozvážacie kolesá zvariť. Súčasťou rekonštrukcie je aj kompletná výmena rotorových ucpávok /tesnení/. Konštrukciu vonkajších telies úplne zachovať.

Obr. 3.3 Nízkotlaký diel, 3D model [11]



3.2.4. Úprava statoru generátora

VVER 440 disponuje 8 kusmi generátorov o výkone 220 MW. Pod každým generátorom je umiestnené jeho vodné, olejové a vodíkové hospodárstvo.

Ide o synchronný striedavý generátor s kombinovaným chladením vodík – voda. Vodíkom je chladený magnetický obvod a rotor generátora, vodou je chladené vinutie statora.

Zámer – Úprava generátorov spočíva v inštalácii štyroch nových statorov generátora, v rámci kostier a retrofitu ďalších štyroch generátorov s použitím nových navinutých vnútorných kostier. Súčasťou stroja je aj dodávka tepelných sond, čidiel chvenia a taktiež čidiel medzi závitových skratov rotora. Monitorovanie stavu statora je realizované na základe analýzy vodíka, analyzátor spektra vodíka. Olejové, vodné a plynové hospodárstvo zostane bez zmien.

3.2.5. Náhrada meracích dýz a VT odlučovačov na parovodoch

Dýzy typu DN 450 a DN 500, kde konfuzor je upevnený medzi predným a zadným telesom jedným mohutným zvarom. Tento fakt spôsobuje prenášanie pnutia, zhoršenie presnosti meraní a taktiež je tu nebezpečenstvo vzniku únavových trhlín. U odlučovačov nečistôt prekážalo sito, ktoré síce zabraňovalo odstráneniu ľahkých objemových nečistôt, no zhoršovalo odlučovanie vody, pretože stenový kondenzát je na site znovu rozprášený a unášaný parou do turbíny.

Záver - Použitím nových meracích dýz so súčasnou zámenou inštrumentácie SKŘ aj v rámci prevodníkov tlakovej diferencie sa dosiahne zníženie tlakových strát v parnom potrubí pri zachovaní presnosti merania prietoku pary.

Nové meracie dýzy budú pracovať s menším diferenčným tlakom, to znamená, že majú väčší priemer konfuzora a tým aj nižšiu celkovú stratu tlaku pary. Tak ako v prípade meracích dýz je hlavným dôvodom zámeny odlučovačov vlhkosti a nečistôt znížiť straty v parnom potrubí na trase z parogenerátora do turbogenerátora. Nové odlučovače budú v dynamickom prevedení. Nečistoty a voda sú umiestnené zo vstupného hrdla hlavného telesa do zachycovača o rovnakom priemere, ako je priemer telesa. Tým je zaručené veľmi účinné zachytenie vody i prípadných mechanických častíc. Novou konštrukciou odlučovačov sa podarí znížiť tlakovú stratu zo 107 na 22 kPa. Použitím nových meracích dýz a odlučovačov dôjde k súčtovému zmenšeniu tlakovej straty na týchto prvkoch o 139 kPa a mimo iné k zvýšeniu celkovej spoľahlivosti, včetně zníženia obsahu vstupu kondenzátu do turbíny, čo povedie k zvýšenej životnosti.

3.2.6. Zámena materiálu trúbiek kondenzátora

Celosvetovým problémom tlakovodných elektrární VVER 440 je výroba teplosmerných plôch kondenzátorov, ale aj ďalších iných výmenníkov konštruovaných z medi a jej zliatin. Pri sledovaní dlhodobého stavu a spoľahlivosti zariadení nastal problém a to erózna korózia. Príčinou prúdiaceho prostredia vznikajú na povrchu rôzne ryhy, priehlbiny, zmenšenie hrúbky stien energetických zariadení (posledné diely lopatiek na NT, ohyby v potrubí) a pod. Jednotlivé komponenty sekundárneho okruhu sú vyrábané z oceli 12 022, ide o uhlíkovú oceľ, ktorá v určitom chemickom režime (napájacia voda, ostrá para) s určitým pH (8,5-8,8) je na túto koróziu náchylná.

Tento defekt spôsobuje zvýšené náklady opráv a údržby, ba dokonca zanášanie teplosmerných plôch parogenerátora (skrátene životnosti, výmena parogenerátora ťažko realizovateľná)

Záver – Zníženie tlaku v kondenzátoroch, vyššie vákuum a zlepšenie hydrauliky chladiacej vody na teplosmerných plochách. Lepší chemický režim, menšie zanášanie trubiek parogenerátora. Dávkovanie NH_4OH do sekundárneho okruhu pri súčasnom odstránení materiálov obsahujúcich meď a jeho zliatiny z parovodného okruhu. Opäť je nutné pomocou dodatočných investícií riešiť zníženie úniku a taktiež likvidáciu odpadnej vody s obsahom amoniaku. Nutná zámena materiálu trubiek kondenzátora za týchto predpokladov a to buď použitím titánu alebo nerezi. Vzhľadom na dlhodobú prevádzku elektrárni sa javí ako materiálová varianta titán.

3.2.7. Zvýšenie hltnosti prepúšťacích staníc do kondenzátoru turbín

Modifikáciou na prepúšťacích staniciach do kondenzátora bolo vyžadované zvýšenie hltnosti prepúšťacích staníc z 380 t/h na cieľových 480 t/h. Táto úprava si vyžiada zásah do parnej vnútornej stavby rýchlouzaverného a regulačného ventilu i do konštrukcie servopohonu.

Záver – Výmena piestu servopohonu za väčší priemer u rýchlo uzatváracieho ventilu a výmena piestu servopohonu u regulačného ventilu. Dané úpravy dosiahneme výmenami piestov a opracovaním vnútorných priemerov valcov v telese servomotora. Cieľom je ešte zaistiť rovnomernejšiu reguláciu hmôt v sekundárnom okruhu medzi napájacou nádržou a hlavným kondenzátorom.

3.2.8. Modernizácia blokových transformátorov

VVER 440 disponuje ôsmymi trojfázovými blokovými transformátormi a jedným náhradným blokovým transformátorom o výkone 250 MVA s prevodom 420/15,75 kV.

Záver - zaistenie spoľahlivého vyvedenia výkonu po zvýšení výkonu generátora pri súčasnom znížení strát blokových transformátorov podľa technických možností. Úprava spočíva v inštalácii troch nových blokových transformátorov + nové vinutie. Majú nové konštrukčné riešenie chladiaceho systému. Ventilátory chladiaceho systému sú ovládané frekvenčnými meničmi v závislosti na teplote oleja. Následne sú koncepčne prepracované radiace skrine. Samozrejme súčasťou blokových transformátorov je aj výmena ochranných prístrojov, poistných a tlakových ventilov, kabeláže atd. Dané riešenie

obsahuje ešte vybavenie pre pripojenie diagnostických prístrojov monitorovacieho systému.

3.2.9. Úpravy monitorovacieho systému transformátora

Transformátory sú projektované pre životnosť izolačných systémov 20 až 25 rokov a stav izolácie je pritom rozhodujúci pre spoľahlivosť a bezpečnú prevádzku transformátorov.

Zámer – nasadenie monitorovacieho systému na princípe kontinuálneho merania a vyhodnocovania dôležitých hodnôt olejových transformátoroch. Ide o najúčinnnejšiu a prakticky jedinou možnosť ako výrazne znížiť vzrastajúcu pravdepodobnosť neočakávaných porúch.

Dôležité hodnoty merania:

- On-line meranie nerozpustných plynov v oleji
- Teplota oleja, vinutie
- Napätie, čiastočné výboje a prúdy
- Binárne signály z riadiacich skríň transformátorov

Po inštalácii monitorovacieho systému sú viac pod kontrolou degradačné javy a vzrastie možnosť predísť ťažkým izolačným poruchám vedúcim k vnútorným stratám transformátora.

3.2.10. Upgrade systému monitorovania (SCORPIO – VVER)

Systém SCORPIO – VVER prevádza monitorovanie aktívnych zón reaktoru EDU a kontrolu limitovaných parametrov za pomoci nameraných hodnôt a on-line napočítaných parametrov. Systém prevádza neutrónový výpočet aktívnej zóny v on-line režime, kontroluje splnenie fyzikálnych a termohydraulických limitov (výkon kazety, palivové tablety, teploty na výstupe chladivá z kaziet)

Zámer - Optimalizácia a rekonštrukcia výkonového poľa v aktívnej zóne reaktora, zavedenie on-line výpočtu a zvýšenie počtu tvarových funkcií, optimalizácia systémových funkcií, zmena algoritmu modelu, adaptácia algoritmu výpočtových modulov na zmenu hodnoty nominálneho výkonu reaktora a adaptácia funkcií systému na požiadavky kontroly súbor. [11]

4. Návrh koncepcie NTO 01

Pri tejto koncepcii vychádzam z normy ČSN 69 0010, ktorá pojednáva o tlakových nádobách stabilných. Táto norma pozostáva z viacerých častí, od všeobecných ustanovení a terminológie, až po výrobu a skúšanie daných nádob.

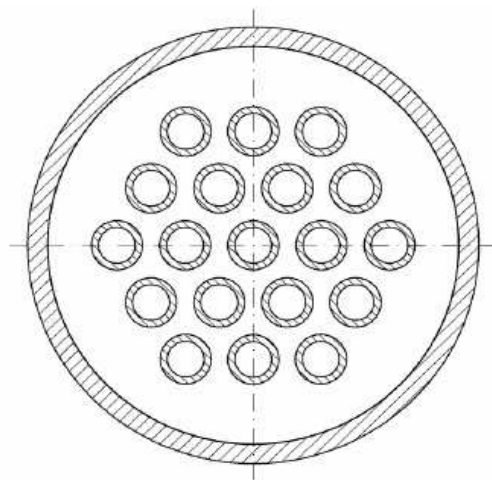
Norma je určená pre časti tlakových nádob namáhaných staticky a to aj za predpokladu, že pri prvom zapnutí na pracovný pretlak a teplotu bude namáhanie cyklické. Výpočtový pretlak väčší než 0,07 MPa, platí pre ohrievače napájanej vody.

Koncepcia obsahuje konštrukčný návrh, voľbu materiálu, zváranie a zvariteľnosť a v závere poukazuje na zjednodušený výrobný postup nízkotlakového regeneračného ohrievača vody (NTO).

4.1. Konštrukčný návrh NTO 01

Trubkový výmenník , zaradený v systéme nízkotlakej regenerácie jadrovej elektrárne VVER 440. Ide vlastne o trubku v trubke, kde v obalovej trubke veľkého priemeru sa nachádza veľké množstvo teplosmerných trubiek. Využíva sa množstvo rôznych geometrických konfigurácií pre ľahšie vyrovnanie mechanických napätí vyvolaných tepelným zaťažením (obzvlášť v prechodových stavoch). NTO 01, vertikálne usporiadanie výmenníku, zvislá zostava trubiek v dvoch ťahoch, ktoré tvoria teplosmernú plochu. (Obr.4.3)

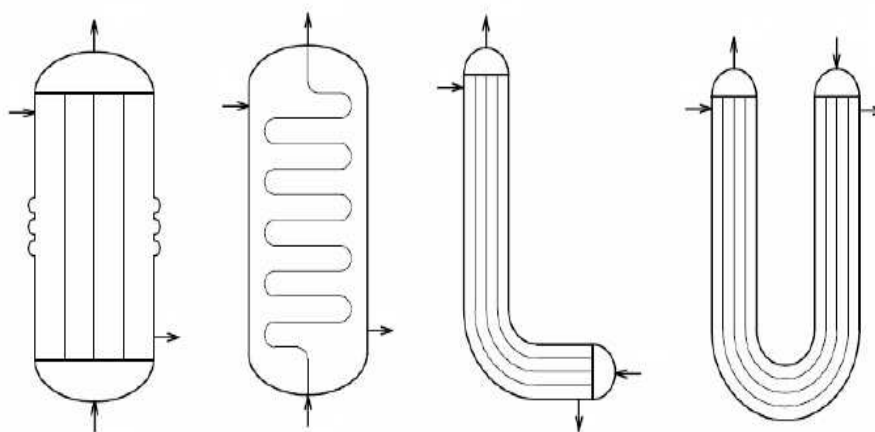
Obr.4.1 Rez NTO, schéma usporiadania trubiek, [12]



Nevýhodou NTO, veľké množstvo zvarov. S týmto faktom je spojená problematika korózie, tepelného ovplyvnenia materiálu, kvality prevedenia zvarov a v neposlednom rade nižšia kompaktnosť tepelného výmenníka.

Medzi ďalšie nevýhody patrí vyšší pomer hmotnosti na jednotku výkonu (vyššie náklady na výstavbu) a pomerne veľké rozmery.

Obr. 4.2 Geometrické konfigurácie trubkových výmenníkov, [12]



4.1.1. Konštrukčné usporiadanie

Vstup a výstup napájacej vody sa nachádza v spodnej časti ohrievaku. Teplosmernú plochu tvoria zvislé trubky usporiadané v dvoch ťahoch. Trubky sú svojimi koncami upevnené do dvoch trubkovníc. Dolná trubkovnica je pevne spojená z plášťom ohrievaku. Horná trubkovnica, opatrená prepúšťacou komorou je voľne umiestená vo vnútri plášťa. Toto riešenie umožňuje tepelnú rozťažnosť teplosmernej plochy.

4.1.2. Určenie množstva napájacej vody

Na základe kapitoly 2. Výpočet parametrov sekundárneho okruhu elektrárne a zjednodušenej tepelnej schémy sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440, príloha A predstavuje nominálne prietochné množstvo napájacej vody $m_v = 994,33 [\text{kg} / \text{s}]$ Vychádzam z predpokladov tepelnej bilancie a jednotlivých množstiev odberovej páry. (kap.2)

4.1.3. Konštrukčné predpoklady

Tab.4.1 Hodnoty, konštrukčný návrh

	Označenie	Rozmer	Jednotka
Vonkajší priemer trubky	de	16	mm
Vnútorý priemer trubky	di	14	mm
Hrúbka steny trubky	S_{TRU}	1	mm
Dĺžka trubky	l	5824	mm
Počet ťahov	z	2	-
Vzdialenosť medzi prepážkami	L	6x730	mm
Počet trubiiek v jednom ťahu	n	4053	ks
Max. priemer zväzku	Dmax	1600	mm

Dané konštrukčné predpoklady sú volené podľa reálnej koncepcie nízkotlakého regeneračného ohrievača, ktorý by mal pracovať v podobnom systéme. Tento projekt je zatiaľ len v štádiu rozpracovania.

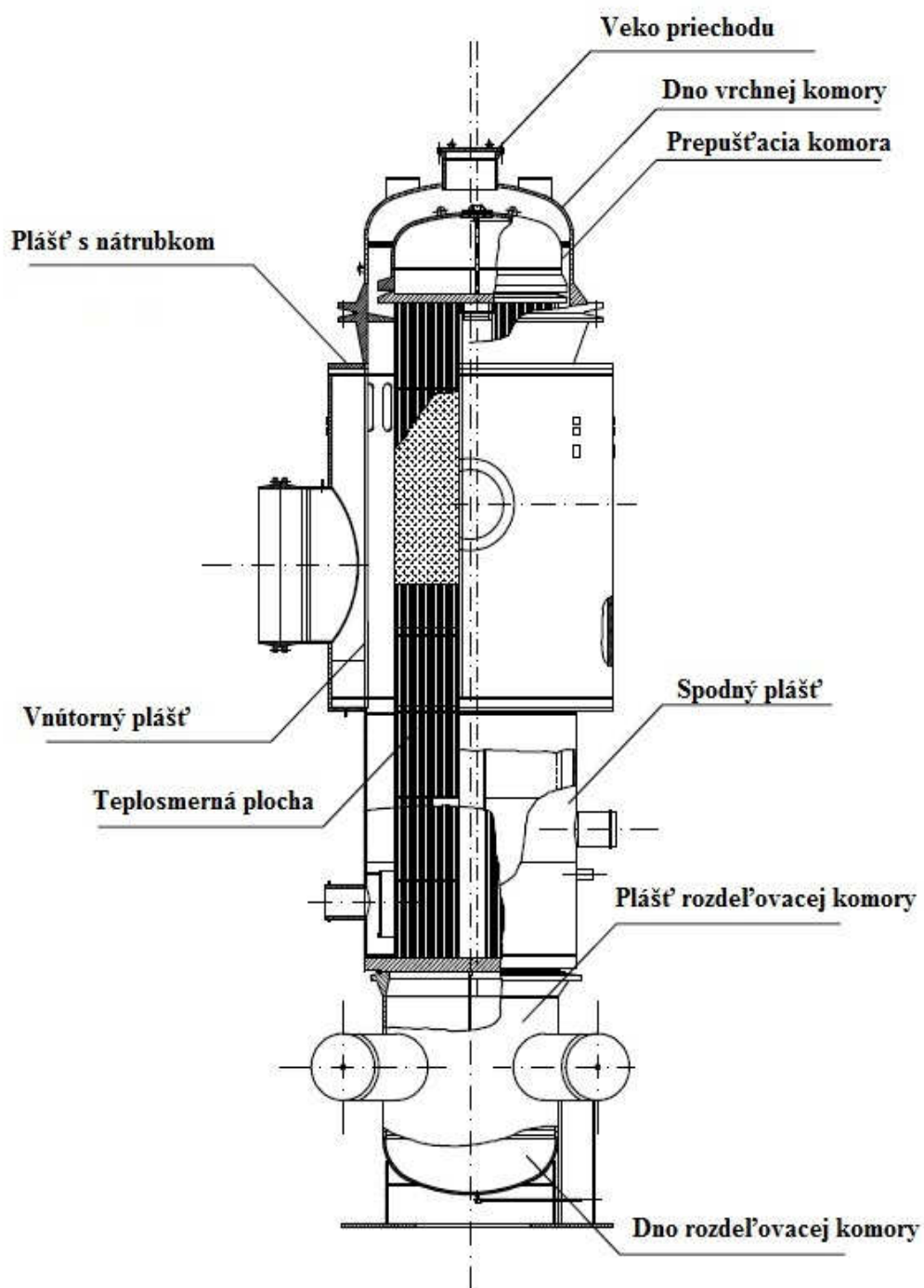
4.1.4. Konštrukčný výpočet teplosmernej plochy

$$S_N = \pi \cdot de \cdot l \cdot n \cdot z \quad (2.1)$$

$$S_N = \pi \cdot 0,0165 \cdot 5824 \cdot 4053 \cdot 2$$

$$S_N = 2371,797 \Rightarrow 2380 [m^2]$$

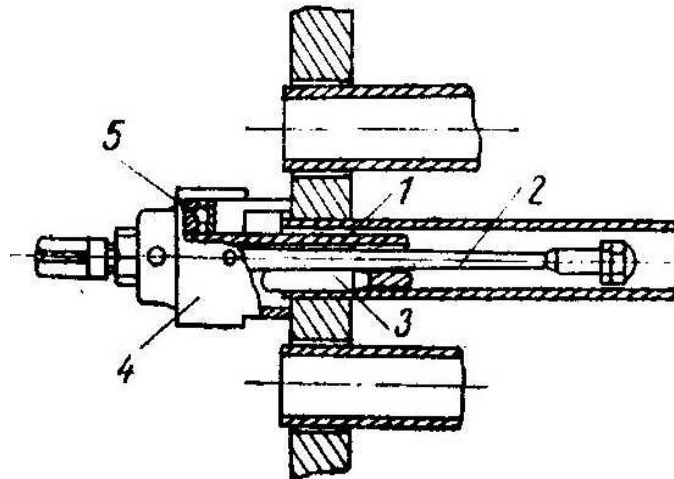
Obr. 4.3 Hlavné konštrukčné časti



4.1.5. Zavalcovanie výhrevných trubiek

Zvislá zostava trubiek v dvoch ťahoch, ktoré tvoria teplosmernú plochu sa nebudú zvärať, ale tzv. zavalcovávať. Ide o technologický proces, ktorý zníži investičné náklady (4053 trubiek) a zvýši spoľahlivosť zariadenia.

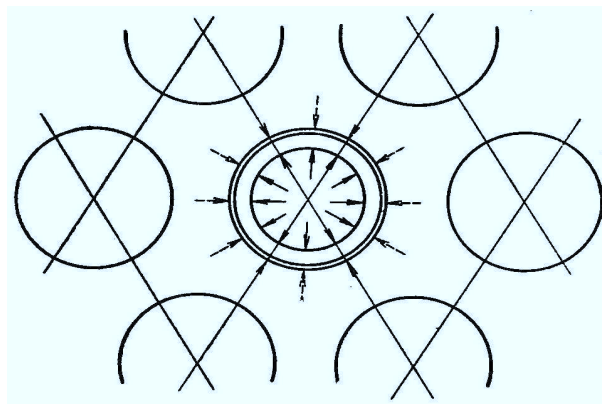
Obr. 4.4 Princíp zavalcovania, [3]



Osa valčeka (3) zavalcovacieho strojčeka je sklonená oproti ose kužeľového tŕňa (2) o 2 - 3°, takže pri otáčaní tŕňa sa súčasne otáčajú aj valčeky, vedené v správnej polohe klietky (1) – posúvajú tŕň vpred.

Trubka sa rozvalcováva po celom svojom obvode tak dlho, až priľne na stenu vyvŕtaného otvoru. Pri ďalšom zavalcovaní sa materiál trubky ďalej deformuje.

Obr. 4.5 Napätie vznikajúce pri zavalcovaní trubky, [3]



Najdokonalejšie zavalcovaný spoj vznikne ak v zavalcovanej časti trubky došlo v celom jej priereze k plastickej deformácii, zatiaľ čo v trubkovnici vzniklo iba pružné napätie.

Zavalcovacia sila nesmie spôsobiť, aby sa materiál trubkovnice plastickey deformoval. Takýto spoj by už nemohol tesniť, vravíme, že spoj je prevalcovaný.

Nevýhody zváraného spoja:

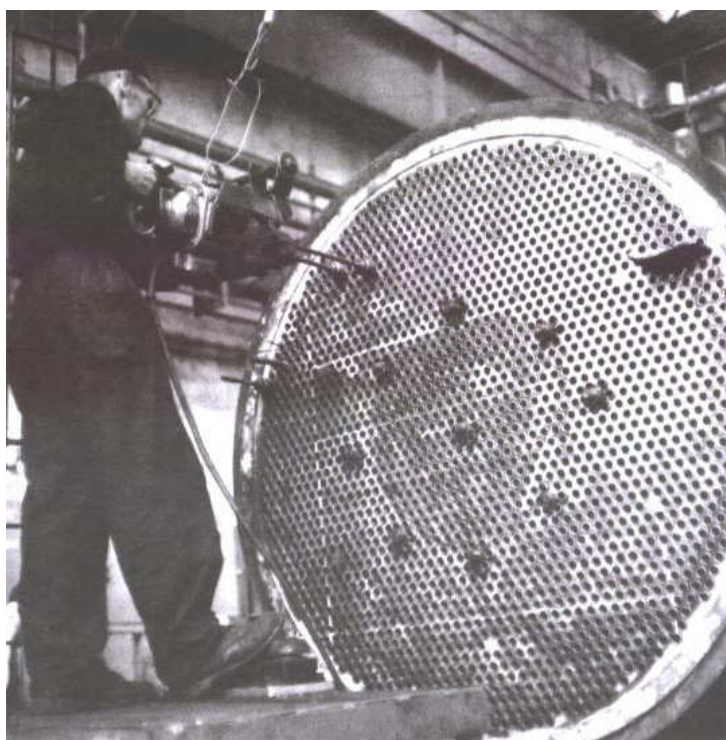
- Značne tepelne namáha materiál spojovacej súčasti, možnosť vzniku trhlín
- U nosných zvarov, bez zavalcovania zbytkovej časti trubky do otvoru trubkovnice je nutné počítať s hrdzou vo zvaroch
- Vyššie požiadavky na technologický proces, obzvlášť na zvárača

Systematika zavalcovania:

Keďže ide o deformačný proces, vznikajú v celej ploche trubkovnice malé pružné pretvorenia. Okraj trubkovnice je plný a pôsobí preto ako väzba. Tieto pretvorenia majú snahu vypuknúť trubkovnicu smerom vonku a tým viac, čím tenšia je trubkovnica a čím väčší je jej priemer. Je preto snahou, najskôr zavalcovať niekoľko tzv. „hniezd“ (časť trubiek, 10-15) vo stredovej časti trubkovnice a následne systematicky zavalcovať zvyšok trubiek.

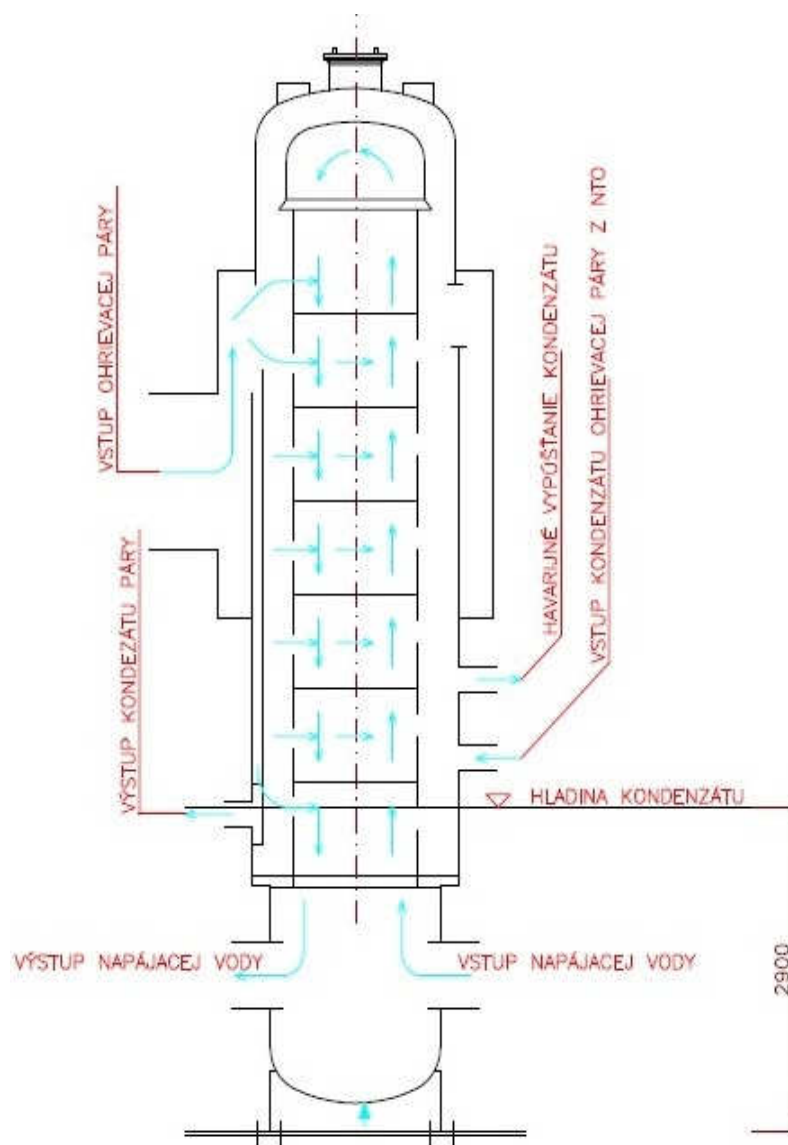
Taktiež je možnosť do niektorých stredových trubiek zasunúť tyč so závitom a trubkovnica sa predopne utiahnutím matíc.

Obr. 4.6 Predopnutie utiahnutím matíc, [3]



Technologické vlastnosti spojov zavalcovaných trubiek sú prevažne závislé na materiáli trubkovnice, vlastnostiach a toleranciách zavalcovanej trubky, presnosti a geometrií otvoru a typu použitej zavalcovačky. Tieto všetky faktory ovplyvňujú životnosť a spoľahlivosť daného zariadenia v prevádzke.

Obr. 4.7 Schéma obehu voda / pára



4.2. Voľba materiálu pre NTO 01

Ako som už spomínal, veľkou nevýhodou NTO je veľké množstvo zvarov. S týmto faktom je spojená problematika korózie, tepelného ovplyvnenia materiálu, kvality prevedenia zvarov a v neposlednom rade nižšia kompaktnosť tepelného výmenníka. Z týchto, samozrejme nielen z týchto dôvodov je voľba materiálu veľmi dôležitá.

Pri voľbe materiálu som postupoval za pomoci normy ČSN 69 0010 – 3.1 Materiál, ktorá obsahuje informácie potrebné k danej problematike. Základné materiály sa líšia podľa požiadavkou zákazníka. Niektoré JE požadujú nerez, niektoré čiernený materiál. Na základe týchto vedomostí som si zvolil nasledujúci materiál, viz.tab.4.2. Väčšinou ide o Sovietske pôvodné materiály, ktoré nemajú ekvivalent podľa EU noriem. Najväčší problém som mal s oceľou 22K a dohľadom chemického zloženia pre danú oceľ,

potrebného pre WPS. Aj keď tieto materiály nemajú často krát EU ekvivalent, mechanicky a zložením sa dajú prirovnať k niektorým našim triedam oceli podľa ČSN.

Tab.4.2 Voľba materiálu

Plášť	20K
Trubkovnica	22K
Nátrubky	20K
Trubky	08Ch18N10T
Spojovací materiál	38ChN3MFA KP80(60)
Ochranné dierované plechy	X6CrNiTi18-10

20K

Skupina oceli pre vyššie teploty. Nízkouhlíková, neušľachtilá, nelegovaná jemnozrnná oceľ na súčasti kotlov a tlakových nádob podľa normy ČSN 42 0090 a ČSN 69 0010.

U tejto oceli je žiadaná zvýšená odolnosť proti starnutiu. Ekvivalent ČSN: 11 418

Tab.4.3 Chemické zloženie, oceľ 20K (hm.%), [13]

20K							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
min.		0,5					
max.	0,2	1,4	0,35	0,25	0,08	0,03	0,025

X6CrNiTi18-10

Skupina oceli, hrdzi odolná, austenitická, zvárateľná stabilizovaná oceľ odolná medzikryštáľovej hrdzi. Je vhodná pre stavbu chemických zariadení, tlakových nádob podľa ČSN 69 0010. Vhodná pre prostredie oxidačnej povahy, pre silné anorganické kyseliny pri veľmi nízkych koncentráciách a v oblasti okolo normálnych teplôt. Je možné túto oceľ taktiež použiť pre prostredie, kde je hrdza zanedbateľná, ale vyžaduje sa vysoká čistota produktu. (farmaceutický, potravinársky priemysel). Ekvivalent ČSN: 17 247, taktiež obdoba 08Ch18N10T podľa GOST 5632 – 72.

Tab.4.4 Chemické zloženie, oceľ X6CrNiTi18-10 (hm.%), [15]

X6CrNiTi18-10							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
min.				17	-		
max.	0,08	2,0	1,0	19	-	0,045	0,03

22K

Akostná uhlíková oceľ, použitie v tepelne spracovanom stave.

Tab.4.5 Chemické zloženie, oceľ 22K (hm.%), [14]

22K							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
min.	0,19	0,7			-		
max.	0,26	1,0	0,035	0,3	-	0,04	0,035

38ChN3MFA

Skupina oceli k zušľacht'ovaniu. Oceľ dobre tvariteľná za tepla, v ušľachtilom stave dobre obrobiteľná. Používa sa hlavne v ušľachtilom stave na menšie hriadele a rôzne strojné súčasti. Ekvivalent ČSN: 13 141, taktiež obdoba 30G2 podľa GOST 4543 – 71.

Tab.4.6 Chemické zloženie, oceľ 38ChN3MFA (hm.%), [16]

38ChN3MFA							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
min.	0,25	1,3		-	-		
max.	0,32	1,65	0,4	-	-	0,035	0,035

4.3. Zváranie NTO 01

Tak ako výroba tlakových nádob, tak aj zváranie a kontrola zvarov spadá pod normu ČSN 69 00 10. Požiadavky naň kladené sú v technickej praxi vysoké z dôvodu možných netesností. Čo sa týka zvárania tlakových nádob je potreba venovať pozornosť hlavne vhodnej technológii zvárania a daného návrhu zváraného spoja.

Konštrukcia by mala byť navrhnutá tak, aby plnila daný účel s čo najväčšou životnosťou a spoľahlivosťou.

U výroby NTO použijeme metódu WIG a automat pod tavidlom. Ide o zváranie technológii rôzneho druhu, ktoré použijem vo svojom návrhu pre danú výrobu. WIG, čo by zváranie zložitých priestorových konštrukcií, zvar s veľmi dobrými vlastnosťami, výborným povrchom a vysokou čistotou.

Automat pod tavidlom, ktorý svojou produktivitou práce, formou zvaru, minimálnym výskytom neprievarov a automatizovanou výrobou splňuje požiadavky zadania na daný zvar. Ďalej k týmto metódam v pod kap. (4.3.4 a 4.3.5)

Vo všeobecnosti zváranie NTO musí byť zhotovené podľa schválenej technickej dokumentácie, rôznych podmienok a požiadavok. Musia sa navrhnúť vhodné opatrenia pre danú konštrukciu, musí sa preškoliť celá rada ľudí, ktorý sa na danej výrobe budú podieľať. K danej koncepcii NTO prikladám špecifikácie postupu zvárania formou WPS pre dané tvary spojov, vid'. príloha [C] a [D]

4.3.1. Zvariteľnosť oceli

Komplexná charakteristika, vyjadrujúca vhodnosť oceli vytvoriť zváraný spoj požadovaných mechanických, fyzikálnych, chemických a technologických vlastností pri určitých metalurgických, konštrukčných a technologických možnostiach s cieľom dosiahnutia jeho požadovanej akosti, spoľahlivosti a životnosti.

Metalurgické vlastnosti zaisťujeme spôsobom výroby oceli, chemickým zložením, spôsobom odlievania, tvárnenia či tepelného spracovania.

Konštrukčné požiadavky zaisťujeme pevnosťnými vlastnosťami materiálu, hrúbkou, tvarom zváraného spoja, prípravou zváraných plôch, tuhosti spoja.

Technologické požiadavky zaisťujeme metódou zvárania, prídavným materiálom, postupom zvárania, tepelným režimom či tepelným spracovaním zvárania. [17]

Zvariteľnosť X6CrNiTi18-10

Chromniklová austenitická oceľ, nekaliteľná, paramagnetická (takmer nemagnetická).

Hlavnými legujúcimi prvkami sú chróm, nikel prípadne molybdén. Charakteristická vlastnosť odolnosť proti korózií, veľká húževnatosť a ťažnosť i pri vysokých teplotách (až 1200° C). Ti v tomto prípade tvorí stabilizačný prvok a zabraňuje tak vzniku karbidu chrómu, čo znamená, že predchádza vzniku medzikryštáľovej hrdzi. Tieto oceli sú vhodné pre prácu do teploty 850° C.

Austenitické oceli sa zvárajú bez predohrevu prídavnými materiálmi zhodnej bázy.

Zvariteľnosť 20K a 22K

Uhlíkové oceli sú zvariteľné bez predohrevu, ak obsah C neprekročí 0,25 hm.% alebo hrúbka steny nepresiahne 25mm. Pri zváraní väčšej hrúbky sa zväčšuje ochladzovacia rýchlosť, čím aj možnosť vzniku zakalenej štruktúry. Buď zvolíme oceľ o inom chemickom zložení, alebo budeme zväčšovať s predohrevom a znížime tak ochladzovaciu rýchlosť. Doporučený predohrev na teploty 100 - 150° C

Pri zváraní sa používajú prídavné materiály zhodných mechanických vlastností vo zváranom kove.

Zvariteľnosť 38ChN3MFA

Ide o konštrukčnú oceľ k zušľachtovaniu, kde legujúcim prvkom je mangán. Mangán zvyšuje Re i Rm, aby bola do určitého obsahu znížená plasticita. Pôsobí ako dezoxidačný prvok a spoločne s Si sa používajú k výrobe ukladných ocelí. Pomocou Mn sa dá znížiť % S v oceli alebo zváranom kove. Tavná zvariteľnosť je v tomto prípade obtiažna, čo v mojom prípade nevádi pretože danú oceľ použijem pre spojovací materiál. (skrutky, matice, podložky). [17]

4.3.2. Zváranie tlakových nádob

- Tlakové nádoby a iné energetické zariadenia musia byť zhotovené podľa schválenej technickej dokumentácie, podmienok a požiadavkou danej výrobkovej technickej norme (ČSN EN 13 480, ČSN EN 13 445, ČSN EN 12 952, ČSN EN 12 953), taktiež v súlade s direktívou PED 97/23/ES.
- Prevádzky a vybavenie musia byť vhodné pre výrobu a musia umožňovať skúšanie a kontrolu týchto výrobkov
- Výrobca musí zabezpečiť prevedenie vhodných opatrení pri návrhu konštrukcie nádoby s použitím príslušných technických a súvisiacich dokumentov
- Zváranie sa zabezpečuje minimálne podľa ČSN EN ISO 3834 – 3, výrobca je zodpovedný za spôsobilosť, výcvik a preskúšanie svojho personálu
- Organizácia riadenia akosti výrobných operácií obsahujúca špeciálne, zvláštne procesy (postupy) pri zváraní, tvárnení, tepelnom spracovaní musí byť u výrobcu definovaná, zabezpečená a zavedená
- U výrobných procesov ako je zváranie, tepelné spracovanie či tvárnenie musí prebiehať priebežná kontrola a dozor
- Ak je na materiál nádoby kladený špecifický požiadavok, musí byť schválený podľa európskych štandardov (EAMS)
- Koordinácia (dozor) zvárania podľa EN ISO 14731 je stanovená výrobcom v technických, technologických dokumentoch.
- Výrobca môže kooperovať niektoré výrobné operácie, ale musí zabezpečiť, aby boli prevedené v súlade s požiadavkami danej normy. Je zodpovedný za akosť zadaných výrobných činností a za následné odpovedajúce záznamy o kooperačnej výrobe.
- Materiály pre tlakové nádoby a ich rozdelenie do skupín musí byť v súlade s ČSN EN 12 952 – 2, event. Inými výrobkovými normami bez ohľadu na tvar polotovaru. Musí byť objednaný v súlade s technickými dodacími podmienkami podľa výrobkovej normy. (EMDS)
- Materiály musia byť doložené včetně dokumentov kontroly. Obsahujú prehlásenie o zhode s materiálovou špecifikáciou.
- Prídavné materiály pre zváranie tlakových nádob a priváranie príslušenstva musia byť v súlade s ČSN EN 12074 a ČSN EN 13479. Ekvivalentné špecifikácie sú prijateľné ak splňujú kritéria. Predpis je prevedený v postupe WPS

- Časti tlakovej nádoby môžu byť zvárané pri splnení určitých podmienok a to: 1. Výrobca má k dispozícii špecifikácie postupu zvárania (WPS). 2. Postupy WPS sú kvalifikované pre určitý rozsah WPQR. 3. Zvárači a zvaračský operátori sú kvalifikovaní a majú platné osvedčenia. [18]

Čo sa týka danej témy ide len o výťah v súlade s direktívou „PED 97/23/ES“, pretože zváranie tlakových nádob a zariadení, požiadavky na materiál a dokumentáciu sú obšírnym predmetom rôznych špecifických noriem a ustanovení. Ide o množstvo noriem, ktoré musí výrobca dodržať aby spĺňal kritéria a požiadavky kladené na tlakové nádoby. Tieto podmienky v podstate zaručujú veľmi úzku skupinu výrobcov, ktorý sa danou výrobou môžu zaoberať.

4.3.3. Kontrola zváraných spojov

Požiadavky na kontrolu zváraných spojov oceľových tlakových nádob a ich časti.

Mimo kontroly behom výroby sa kontrolujú zvárané spoje tlakových častí týmito spôsobmi a to vonkajšou prehliadkou, skúškami bez porušenia, mechanickými a technologickými skúškami, metalografickými skúškami, skúškami na medzikryštálickú koróziu, meraním tvrdosti a prvou tlakovou skúškou nádoby – vid' ČSN 69 0010, časti 7.1, 8.1 a 10.1

Konečná kontrola zváraných spojov, ktoré podliehajú tepelnému spracovaniu sa prevádza po tepelnom spracovaní, s výnimkou kontrolných operácií, u ktorých tepelné spracovanie nemá vplyv na výsledky kontroly.

Miesta, v ktorých sa zistia neprípustné vady musia byť odborne opravené podľa schváleného postupu WPS a znovu preskúšané.

Vizuálna kontrola prebieha po očistení zváraných spojov a dôraz sa kladie nielen na tvar a rozmer zváraného spoja, ale aj na povrchové defekty ako zápaly, otvorené bubliny či trhliny. Na tieto vady sú uvedené kritéria pre daný stupeň akosti spoja.

Medzi skúšky bez porušenia patrí napr. ultrazvuk, snaha o zistenie skrytých vnútorných chýb. Mechanické a technologické skúšky prebiehajú na skúšobných tyčiach zo vzoriek odobraných z kruhov, segmentov atd.

Metalografickými skúškami sa kontroluje celistvosť (trhliny, bubliny, studené spoje, neprevarený koreň) a štruktúra jednotlivých oblastí zváraného spoja.

Skúška tvrdosti za pomoci odberu skúšobných vzorkou, skúška podľa HV.

Rozsah týchto skúšok sa volí podľa kategórie nádoby, sú činiteľa hodnoty zváraného spoja a nakoniec podľa údajov v technickej dokumentácii.

Kontrola zváraných spojov patrí medzi dôležité časti výroby NTO, obzvlášť kvôli možným netesnostiam, novej korózii, TOO, životnosti a celkovej spoľahlivosti. [19]

4.3.4. WIG

WIG / TIG (141), oblúkové zváranie v ochrannej atmosfére, zváranie netaviacou sa volfrámovou elektródou v inertnom plyne.

Používa sa v oblastiach zvárania trubkových systémov chemických, potravinárskych a energetických zariadení. Sú možné 2 varianty a to ručné zváranie alebo automatická verzia orbitálneho zvárania.

Pri zváraní touto metódou horí oblúk medzi netaviacou sa elektródou a základným materiálom. Ochranu elektródy a tavnej lázne pred atmosférou zabezpečuje inertný plyn o vysokej čistote, až 99,995 %. Používa sa argón, hélium alebo ich zmesi.

Metalurgické a technologické výhody:

- Inertný plyn zabezpečuje efektívnu ochranu zvárannej lázne a prehriatej oblasti základného materiálu pred účinkami O₂, výsledkom je čistý povrch zvaru
- Nevyžaduje použitie tavidiel
- Vysoká operatívnosť pri zváraní v polohách
- Priaznivé formovanie zvárannej húsenice
- Zabezpečuje zvary vysokej celistvosti i na materiáloch náchylných na naplynenie a oxidáciu pri zvýšených teplotách
- Jednoduchá obsluha a presná regulácia parametrov zvárania
- Viditeľná zvarová lázeň, ľahko ovládateľná

Použitie:

- Zvárané konštrukcie z vysokolegovaných ocelí pre chemický, farmaceutický a potravinársky priemysel, taktiež klasickú ale aj jadrovú energetiku
- Žiarupevné a žiaruvzdorné oceli pre stavbu kotlov, tepelných výmenníkov a pecí
- Titánové, zirkonové a špeciálne zliatiny v oblasti výroby lietadiel a kozmickej techniky
- Hliníkové zliatiny v oblasti dopravnej techniky a všeobecného strojárstva
- Zliatiny medi, niklu, molybdénu

Rozdelenie a charakteristiku ochranných plynov popisuje norma ČSN EN ISO 14 175 „Prídavné materiály – plyny a ich zmesi pre tavné zváranie a príbuzné procesy“. [17]

Zásady pri zváraní vysokolegovaných ocelí:

- Používa sa jednosmerný prúd
- Plynová ochrana zaistená Ar, Ar + He pre austenitické oceli. Héliom i vodíkom sa zvyšuje prenos tepla do zvaru a tým aj hĺbka závaru a rýchlosť zvárania
- Tl. nad 4 mm, úprava hrany do úkosu V
- Hodnota zváracieho prúdu sa volí od 30 do 50 A na 1mm tl. materiálu
- U viacvrstvových zvarov dodržiavať teplotu interpass max. 100°C, používať úzke húsenice

Obr. 4.8 Detail navarenia príruby



4.3.5. Automat pod tavidlom

Zváranie pod tavidlom (12*) je v podstate zváranie elektrickým oblúkom, ktorý horí medzi holou elektródou neobmedzenej dĺžky a zváraným materiálom pod ochrannou vrstvou tavidla. Väčšinou sa jedná o automatizovanú metódu.

Výhody:

- Veľký prievar do základného materiálu
- Veľká prúdová hustota i pri tenkých zváracích drôtoch
- Zvýšená kvalita zvaru
- Roztavenie 2 až 5krát viac kovu elektródy než u WIG či MIG/MAG

Nevýhody:

- Zvýšené nároky na prípravu zváraných plôch a ich čistotu
- Široká tepelne ovplyvnená oblasť (niekedy výhoda)
- Skrytý zvarací proces a obtiažnosť jeho kontroly
- Možnosť zvarovania iba v polohách PA alebo PB podľa ČSN EN ISO 6947
- Obtiažné odstraňovanie strusky u viac vrstvých zvarov, obzvlášť pri zvaraní do úzkej medzery

Ďalšia charakteristika:

- Minimálna ekonomická dĺžka zvaru: nad 1000 mm
- Hrúbka zváraného materiálu: 3 až 100 mm, aj viac
- Zvarací prúd: 200 až 2000 A
- Zvaracia rýchlosť: 15 až 120 m. h⁻¹

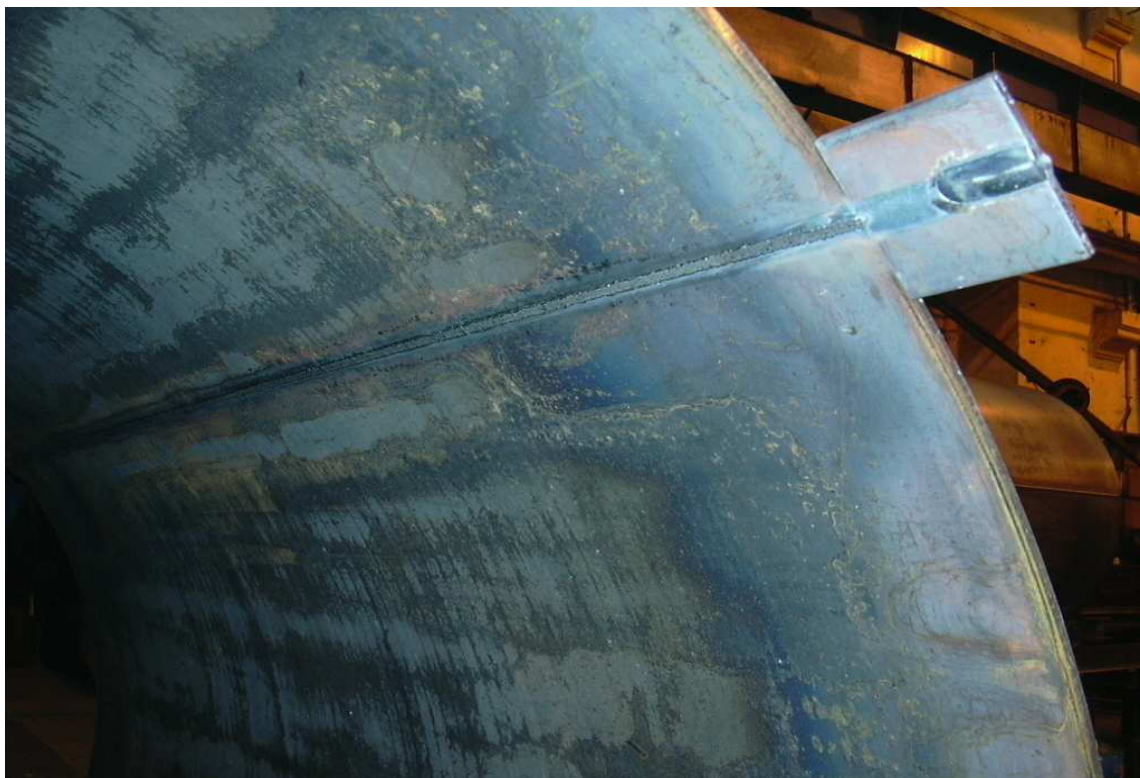
Návrh zváraného spoja:

Tvar a typ zváraného spoja určuje hrúbka zváraného materiálu, orientačne ide využiť normu ČSN EN 29692. Tupé spoje až do hrúbky 15 mm ide zvarovať jednostranne, pri väčších hrúbkach je potreba zvarovať z oboch strán. Pre zachytenie sypkého tavidla na začiatku zvarovania a roztaveného zváraného kovu a tavidla sa používa špeciálna podložka podľa danej konštrukcie.

Použitie:

Zváranie pod tavidlom sa využíva od hrúbky 3 mm. Ekonomický výhodne je predovšetkým u hrúbok nad 50 mm, kde sa zvara do tzv. úzkeho úkosu s uhlom rozovretia 0 až 8°. Ide o zváranie hrubostenných tlakových nádob, rotorov turbín či chemických zariadení. Táto technológia sa taktiež využíva pri výrobe lodných, mostových, stavebných a žeriavových konštrukcií. [17]

Obr. 4.9 Pohľad na zvar zhotovený pomocou automatu pod tavidlom



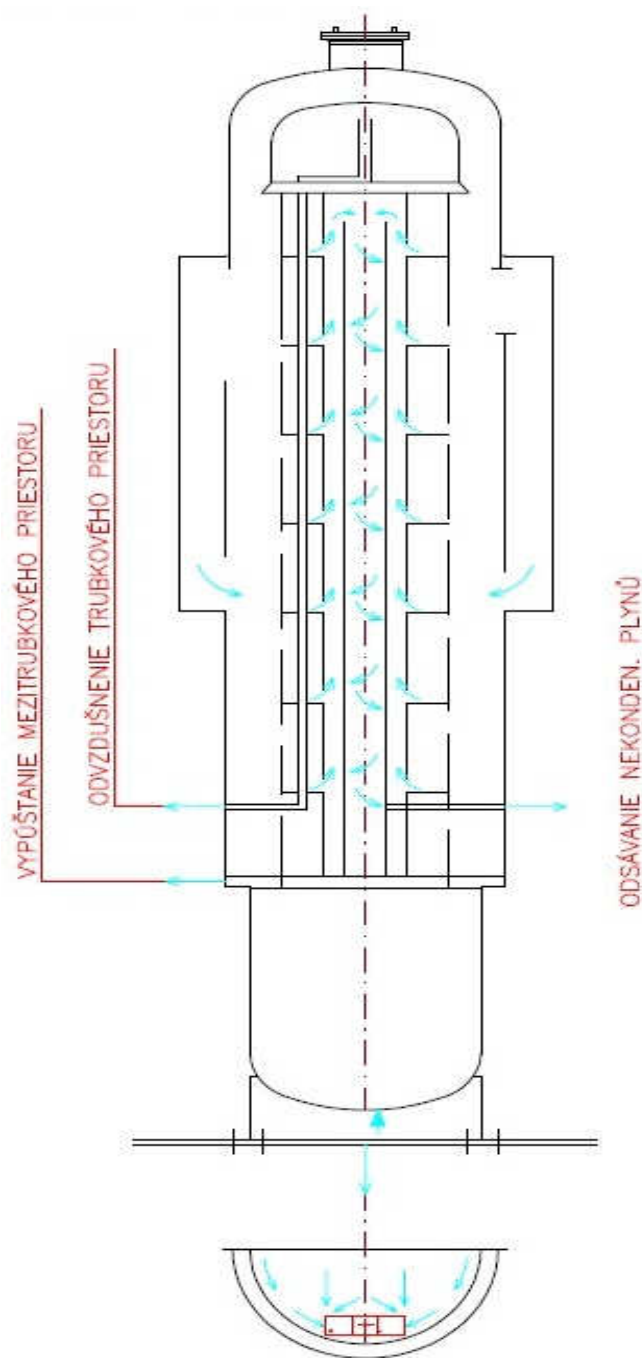
4.4. Výrobný postup

NTO, tlaková nádoba namáhaná staticky. Za statické namáhanie časti je možno považovať aj časti tlakových nádob namáhaných cyklicky pri zapojení do prevádzky na pracovný pretlak a teplotu.

Zjednodušený výrobný postup výroby plášťa NTO prikladám v prílohe [B]. Daný výrobný postup obsahuje číslo operácie, úsek, popis práce, náradie a pomôcky. Výrobný postup je obzvlášť zjednodušený, v podstate ide o koncept postupu výroby pre lepšiu predstavivosť zložitosti a náročnosti výroby NTO.

Pozostáva z desiatich väčších operácií, ktoré na seba nadväzujú, od rezania tabule, až po montáž a kontrolu. Základ postupu tvorí výroba plášťa tlakovej nádoby z materiálu 20K. Výrobný postup nerozoberá podrobnejšie celkovú montáž NTO ako napr. ustavenie trubkovníc, dna , vek, taktiež postup kontroly RTG. Na takejto technickej dokumentácii sa podieľa veľké množstvo preškoleného personálu, ktorý podlieha určitej kvalifikácii.

Obr. 4.10 Schéma odsávania nekondenzujúcich plynov a odvodnenie parného a vodného priestoru



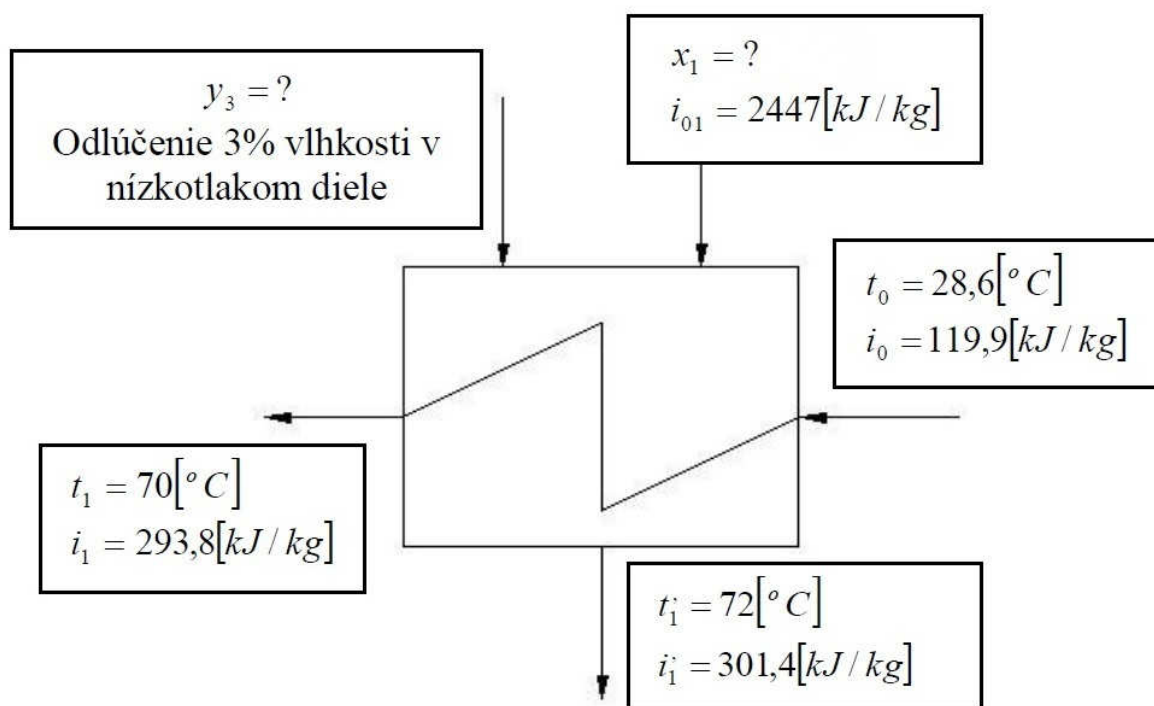
Obr. 4.10 a obr. 4.7 aj ako súčasť výkresovej dokumentácie. (č. v. 535 – PET.D – 196),
príloha [E]

5. Tepelný výpočet NTO 01

Pri tomto výpočte vychádzam zo zjednodušenej tepelnej schémy sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440 (obr.2.1). Z kapitoly 2.2 Výpočet ohrievania napájacej vody som následne ešte raz predviedol postup výpočtu tepelnej bilancie NTO 01. Pri tomto výpočte som vychádzal z tab.2.1. Výsledky získane týmto riešením sú uvedené v tab. 2.2.

5.1. Tepelná bilancia

Obr.5.1 NTO 01



Množstvo odberovej páry

$$\left[1,01 - (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)\right] \cdot (i_1 - i_0) = x_1 (i_{01} - i_1) \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} & \left[1,01 - (0,0364 + 0,0391 + 0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)\right] \cdot (293,8 - 119,9) \\ & = x_1 (2447 - 301,4) \Rightarrow x_1 = 0,0486 [-] \end{aligned}$$

x_1 predstavuje relatívne množstvo odberovej páry v NTO 01

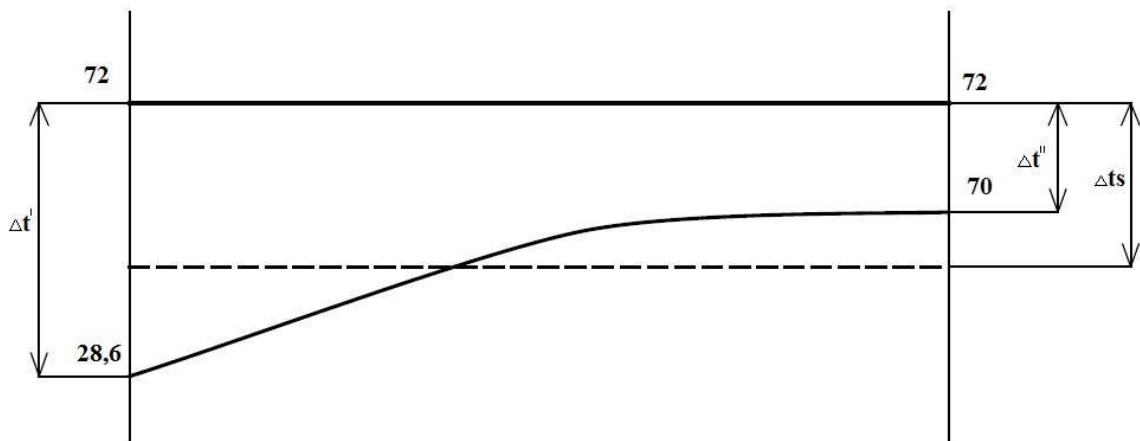
$$mp = x_1 \cdot Q_{mp} = 0,0486 \cdot 1668,6 = 81,09 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.2)$$

Hodnotu Q_{mp} som použil z výpočtu parametrov sekundárneho okruhu elektrárne, presnejšie z kapitoly 2.3 Výpočet účinnosti navrhnutej elektrárne.

5.2. Stredný logaritmický rozdiel teplôt

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{43,4 - 2}{\ln \frac{43,4}{2}} = 13,45 [^{\circ}C] \quad (5.3)$$

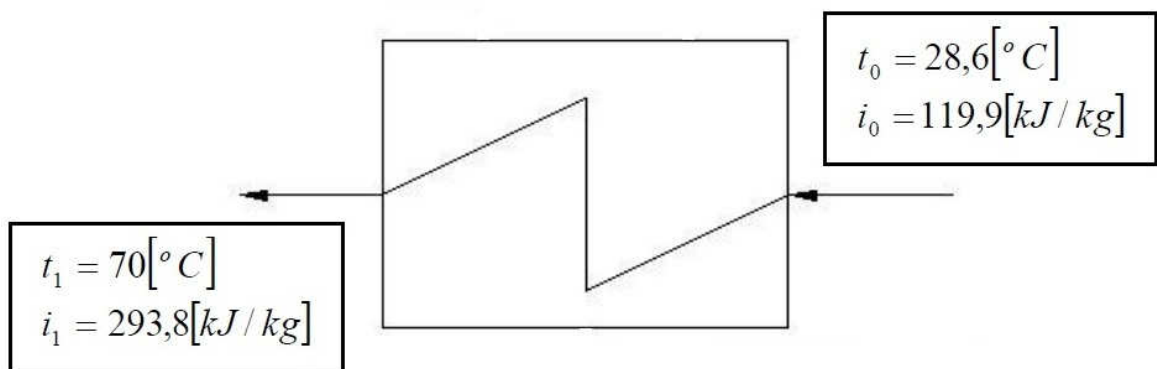
Obr. 5.2 Priebeh teplôt



5.3. Strana vody

5.3.1. Stredná teplota napájacej vody

Obr.5.3 Ohrievač 01, strana vody



$$t_w = \frac{t_1 + t_0}{2} = \frac{70 + 28,6}{2} = 49,3 \Rightarrow 50 [^{\circ}C] \quad (5.4)$$

Parametre vody pre túto teplotu potrebné pre následný výpočet, [20]

Tab. 5.1 Parametre vody

ρ_v	988	kg / m^3
cv	4,178	KJ/kg.K
λ_v	0,647	W/m.K
Prv	3,54	-
η_v	555,056.10 ⁻⁶	Pa.s
ν_v	0,157.10 ⁻⁶	m^2 / s

Nasledujúca časť výpočtu vyplýva z predpokladov konštrukčného návrhu, v nej uvedených symbolov, skratiek a hodnôt.

5.3.2. Prietoková plocha

$$S = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} \cdot 4053 = 0,624 [m^2] \quad (5.5)$$

5.3.3. Stredná rýchlosť vody v trubke

$$w_v = \frac{m_v}{\rho_v \cdot S} = \frac{994,33}{988 \cdot 0,624} = 1,61 [m / s] \quad (5.6)$$

5.3.4. Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_v \cdot d_i}{\nu_v} = \frac{1,61 \cdot 0,014}{0,157 \cdot 10^{-6}} = 143566,88 [-] \quad (5.7)$$

5.3.5. Nusseltovo číslo

Výpočet podľa Hausenovho vzorca [21]

Oblasť platnosti vzorca:

$$Re = 7000 - 10^6$$

$$L / D = 1 - \infty$$

$$Pr = 1 - 1500$$

Odhad teploty steny

$$t_{ST1} = 70^{\circ}C, \eta_{ST1} = 404,034 \cdot 10^{-6} Pa.s$$

$$Nu = 0,036 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\eta_v}{\eta_{ST1}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{di}{L} \right)^{1/18} \quad (5.8)$$

$$Nu = 0,036 \cdot 143566,88^{0,8} \cdot 3,54^{1/3} \cdot \left(\frac{555,056 \cdot 10^{-6}}{404,034 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{0,014}{5,824} \right)^{1/18}$$

$$Nu = 547,97 [-]$$

5.3.6. Súčiniteľ prestupu tepla na strane vody

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{di} = \frac{547,97 \cdot 0,647}{0,014} = 25324,04 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.9)$$

5.3.7. Tepelný odpor na strane vody

$$R_v = \frac{1}{\alpha_v} \cdot \frac{de}{di} = \frac{1}{25324,04} \cdot \frac{0,016}{0,014} = 4,51 \cdot 10^{-5} [m^2 KW^{-1}] \quad (5.10)$$

5.4. Strana páry

Tab. 5.2 Parametre kondenzačnej blany pre teplotu $t_p = 72^{\circ}C$, [20]

ρ_p	977,7	kg/m ³
η_p	404,034.10-6	Pa/s
λ_p	0,668	W/m.K
g	9,81	m/s ²
r	2145600	J/kg

5.4.1. Súčiniteľ prestupu tepla pre blanovú kondenzáciu

$$\alpha_p = 1,51 \cdot \left(\frac{\rho_p^2 \cdot \lambda_p^3 \cdot g \cdot r}{\eta_p \cdot l \cdot \Delta t} \right)^{0,25} \quad (5.11)$$

$$\alpha_p = 1,51 \cdot \left(\frac{977,7^2 \cdot 0,668^3 \cdot 9,81 \cdot 2145600}{404,034 \cdot 10^{-6} \cdot 0,62} \right)^{0,25}$$
$$\alpha_p = 15947,95 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$
$$\Delta t = t_p - t_{ST1} = 72 - 70 = 2 [^{\circ}C] \quad (5.12)$$

5.4.2. Tepelný odpor na strane páry

$$R_p = \frac{1}{\alpha_p} = \frac{1}{15947,95} = 6,27 \cdot 10^{-5} [m^2 K / W] \quad (5.13)$$

5.5. Stena trubky

5.5.1. Tepelný odpor steny trubky

$$R_{TR} = \frac{de}{2 \cdot \lambda_{TR}} \cdot \ln \frac{de}{di} = \frac{0,016}{2 \cdot 16,5} \cdot \ln \frac{0,016}{0,014} = 6,474 \cdot 10^{-5} [m^2 K / W] \quad (5.14)$$

5.6. Prestup tepla

$$k = \frac{1}{R_v + R_{TR} + R_p} = \frac{1}{4,51 \cdot 10^{-5} + 6,474 \cdot 10^{-5} + 6,27 \cdot 10^{-5}} \quad (5.15)$$

$$k = 5795,76 [W / m^2 K]$$

5.7. Upresnenie teploty steny

$$t_{ST} = t_p - \frac{k \cdot \Delta t_s}{\alpha_p} = 72 - \frac{5795,76 \cdot 13,45}{15947,95} \quad (5.16)$$

$$t_{ST} = 67,11 [^{\circ}C]$$

5.8. Tepelný tok

$$Q = m_v \cdot c_v \cdot (t_1 - t_0) = 994,33.4290 \cdot (70 - 28,6) \quad (5.17)$$

$$Q = 176598974 [W]$$

5.9. Veľkosť teplosmernej plochy

$$S_v = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_s} = \frac{176598974}{5795,76.13,45} \quad (5.18)$$

$$S_v = 2265,46 [m^2]$$

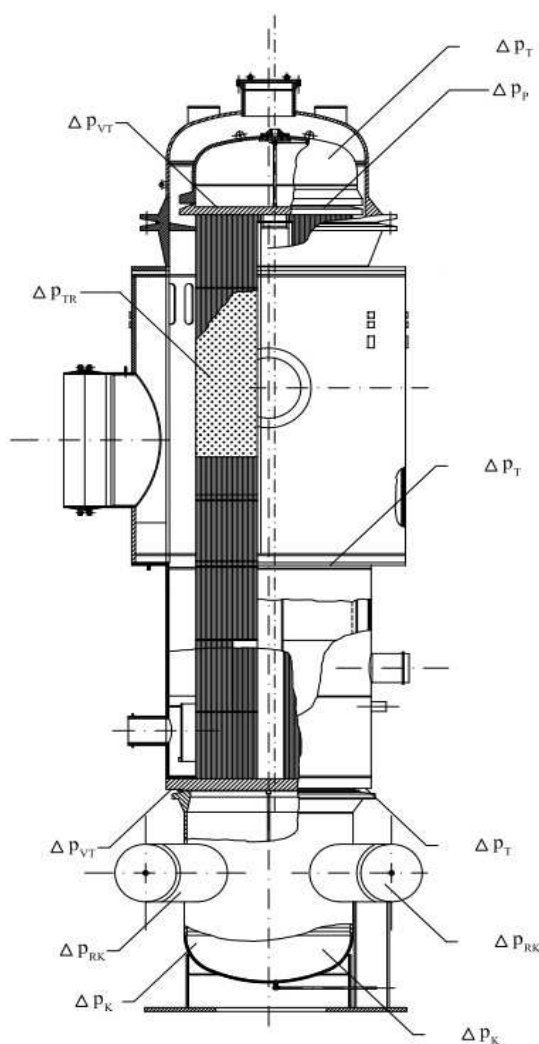
Návrh teplosmernej plochy odpovedá hodnote $S_N = 2380 [m^2]$, tepelný výpočet $S_v = 2265,46 [m^2]$. Toto zväčšenie (5 %) poukazuje na akúsi menšiu nepresnosť riešenia, či zanesenie teplosmernej plochy behom prevádzky ohrievača.

$$\frac{S_N}{S_v} = \frac{2380}{2265,46} \approx 1,051 \quad (5.19)$$

6. Hydraulický výpočet

Výpočet za účelom určenia prietochných strát teplotonosných látok vo výmenníku. Slúži k posudzovaniu nákladov energie a pre dimenzovanie zariadení zaisťujúcich prúdenie teplotonosných látok. Celková tlaková strata po priechode napájacej vody ohrievačom musí byť menšia alebo rovná maximálnej tlakovej strate Δp_{\max} .

Obr. 6.1 Miesta vzniku tlakových strát



Tlakové straty:

Δp_{TR} - trecia strata v trubkách, Δp_K - v rozdeľovacej komore, Δp_P - v prepúšťacej komore,

Δp_T - vstup do trubkovnice, Δp_{VT} - výstup z trubkovnice,

Δp_{RK} - vstup do rozdeľovacej komory, Δp_{VRK} - výstup z rozdeľovacej komory

Celková tlaková strata = celk. tl. strata trením + celk. tl. strata miestnych odporov

$$\Delta p_{cel} = \Delta p_{ZC,t} + \Delta p_{ZC,m} = \sum_{i=1}^n \left(\lambda_i \cdot \frac{L_i}{de_i} \cdot \frac{w_i^2}{2} \cdot \rho_i \right) + \sum_{j=1}^m \left(\zeta_j \cdot \frac{w_j^2}{2} \cdot \rho_j \right) \quad (6.1)$$

6.1. Tlaková strata trením

$Re = 2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$ pre turbulentné prúdenie v trubkách s hladkými stenami

- Platí vzťah podľa Hermannu, [22]

$$\lambda_{TR} = 0,00540 + 0,3964 \cdot Re^{-0,3} \quad (6.2)$$

$$\lambda_{TR} = 0,0166 [-]$$

$$\Delta p_{TR} = \lambda_{TR} \cdot \frac{L_{TR}}{di} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v \quad (6.3)$$

$$\Delta p_{TR} = 0,0166 \cdot \frac{2,5,824}{0,014} \cdot \frac{1,61^2}{2} \cdot 988$$

$$\Delta p_{TR} = 17685,21 [Pa]$$

6.2. Tlaková strata miestnymi odpormi

6.2.1. Rozdeľovacia komora

Prierez vstupného hrdla:

$$S_{vh} = \frac{\pi \cdot d_{vh}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,606^2}{4} = 0,288 [m^2] \quad (6.4)$$

Obr. 6.2 Vstupné hrdlo $\varnothing 630 \times 12$ (3D model)



Rýchlosť na vstupe:

$$w_v = \frac{m_v}{\rho_v \cdot S_{vh}} = \frac{994,33}{988 \cdot 0,288} = 3,49 [m/s] \quad (6.5)$$

Stratový súčiniteľ zmeny smeru:

$$\zeta_{RK} = 0,6 \text{ podľa, [22]}$$

$$\Delta p_{RK} = \zeta_{RK} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v = 0,6 \cdot \frac{3,49^2}{2} \cdot 988 = 3610,2 [Pa] \quad (6.6)$$

$$\Delta p_{RK,c} = 2 \cdot \Delta p_{RK} = 7220,4 [Pa]$$

6.2.2. Prepúšťacia komora

Stratový súčiniteľ zmeny smeru

$$\zeta_P = 0,5 \text{ podľa [23]}$$

$$\Delta p_P = \zeta_P \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v = 0,5 \cdot \frac{3,49^2}{2} \cdot 988 = 3008,48 [Pa] \quad (6.7)$$

6.2.3. Vstup do trubkovnice

$$\zeta_T = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_{zuz}}{S_{tr}}\right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,624}{1,0048}\right) = 0,189 [-] \quad (6.8)$$

$$S_{zuz} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} \cdot 4053 = 0,624 [m^2] \quad (6.9)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} / 2 = \frac{\pi \cdot 1,6^2}{4} / 2 = 1,0048 [m^2] \quad (6.10)$$

V tomto prípade di (max. priemer zväzku), kapitola 4

Strata náhlým zúžením

$$\Delta p_T = \zeta_T \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v = 0,189 \cdot \frac{3,49^2}{2} \cdot 988 = 1137,21 [Pa] \quad (6.11)$$

$$\Delta p_{T,c} = 2 \cdot \Delta p_T = 2274,42 [Pa]$$

6.2.4. Výstup z trubkovnice

$$\zeta_{VT} = \left(1 - \frac{S_{uz}}{S_{tr}}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,624}{1,0048}\right)^2 = 0,144[-] \quad (6.12)$$

Strata náhlým rozšířením

$$\Delta p_{VT} = \zeta_{VT} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v = 0,144 \cdot \frac{3,49^2}{2} \cdot 988 = 866,44 [Pa] \quad (6.13)$$

$$\Delta p_{VT,c} = 2 \cdot \Delta p_{VT} = 1732,88 [Pa]$$

6.2.5. Vstup do rozdělovací komory

$$\zeta_{RK} = \left(1 - \frac{S_N}{S_K}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,288}{3,97}\right)^2 = 0,86[-] \quad (6.14)$$

$$S_N = \frac{\pi \cdot d_N^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,606^2}{4} = 0,288 [m^2] \quad (6.15)$$

$$S_K = \frac{\pi \cdot d_K^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,25^2}{4} = 3,97 [m^2] \quad (6.16)$$

Strata náhlým rozšířením

$$\Delta p_{RK} = \zeta_{RK} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v = 0,86 \cdot \frac{3,49^2}{2} \cdot 988 = 5174,59 [Pa] \quad (6.17)$$

6.2.6. Výstup z rozdělovací komory

$$\zeta_{VRK} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_N}{S_K}\right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,288}{3,97}\right) = 0,464[-] \quad (6.18)$$

Strata náhlým zúžením

$$\Delta p_{VRK} = \zeta_{VRK} \cdot \frac{w_v^2}{2} \cdot \rho_v = 0,464 \cdot \frac{3,49^2}{2} \cdot 988 = 2791,87 [Pa] \quad (6.19)$$

6.3. Celková tlaková strata

Doporučená max. přípustná tlaková strata je $40kPa$

$$\Delta p_{cel} = \Delta p_{TR} + \Delta p_{RK,c} + \Delta p_P + \Delta p_{T,c} + \Delta p_{VT,c} + \Delta p_{RK} + \Delta p_{VRK} \quad (6.20)$$

$$\Delta p_{cel} = 17685,21 + 7220,4 + 3008,48 + 2274,42 + 1732,88 + 5174,57 + 2791,87$$

$$\Delta p_{cel} = 39887,83 [Pa]$$

$$\Delta p_{cel} = 39,89kPa \leq 40kPa$$

7. Návrh využitia odpadnej vody

Návrh využitia odpadnej vody poukazuje na množstvo energie v tejto vode, snaží sa načrtnúť možné technické riešenie využitia a taktiež umožniť a priblížiť odhad na danú výstavbu a prevádzku navrhnutého spôsobu. Daným návrhom chcem poukázať, že využitím odpadného tepla je možné dosiahnuť značných úspor.

7.1 Výpočet množstvá energie v odpadnej vode

Energia vo forme odpadnej vody tvorí veľké množstvo tekutín. Táto energia je prevažne nízkopotenciálna, pretože energia o vysokej teplote sa opäť využíva v technológiách elektrárne k zvýšeniu celkovej účinnosti. Dané teplo je možné odoberať zo štyroch miest systému a to cirkulačná chladiaca voda, retenčná nádrž, odluky a z vypúšťania brodovej páry z odplyňovačov.

Cirkulačná chladiaca voda

Najväčším zdrojom tepla je okruh cirkulačnej chladiacej vody, ktorý odvádza teplo z kondenzátorov prostredníctvom chladiacich veží do atmosféry. Za normálnej prevádzky pracuje v čerpacej stanici cirkulačnej chladiacej vody vždy len jedno čerpadlo na jeden hlavný výrobný blok.

Voda sa vedie zdvojeným hlavným rozvádzacím kolektorom spoločným pre celý blok. V plnej prevádzke kolektorom prechádza $150\,000\text{ m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$. Projektovaná teplota vody 20°C , behom prevádzky sa môže pohybovať v rozmedzí $15 - 30^\circ\text{C}$. Tento fakt nabáda k využitiu tepla pomocou tepelných čerpadiel pracujúcich s nízkoteplotnou otopnou sústavou.

Prietok $1200\text{ až }2500\text{ m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$.

Približná využiteľná energia:

$$Q = M (\dot{i}_I - \dot{i}_{III}) = 1200 \cdot (42 - 20) = 26,4 \cdot 10^3 [\text{kJ} / \text{hod}] \quad (7.1)$$

Odvedený tepelný výkon:

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{26,4 \cdot 10^3}{3600} = 7,33 [\text{MW}] \quad (7.2)$$

Odluh

Z cirkulačnej chladiacej vody bloku sa celkom odvádza približne $2200 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. odluhu. Teplota sa mení podľa rozvodného či vratného kolektoru.

Tab.7.1 Prehľad veličín

Prietok	Teploty - merné entalpie sýtych kvapalín		
M	$t_I - i_I$	$t_{II} - i_{II}$	$t_{III} - i_{III}$
2200	30 - 134,1	21 - 104,3	5 - 21,1
kg/hod	°C - kJ/kg	°C - kJ/kg	°C - kJ/kg

Odluh z vratného kolektoru:

$$Q_1 = M (i_I - i_{III}) = 2200 \cdot (134,1 - 21,1) = 248,6 \cdot 10^6 \text{ [kJ / hod]} \quad (7.3)$$

Odluh z rozvodného kolektoru:

$$Q_2 = M (i_{II} - i_{III}) = 2200 \cdot (104,3 - 21,1) = 183 \cdot 10^6 \text{ [kJ / hod]} \quad (7.4)$$

Odpovedajúce tepelné výkony:

$$P_1 = \frac{Q_1}{t} = \frac{248,6 \cdot 10^6}{3600} = 69,06 \text{ [MW]} \quad (7.5)$$

$$P_2 = \frac{Q_2}{t} = \frac{183 \cdot 10^6}{3600} = 50,83 \text{ [MW]} \quad (7.6)$$

Odplyňovák

Je zaradený v systéme regenerácie vytápaný parou. Z tejto časti sa do atmosféry priamo vypúšťa $3,5$ až $7 \text{ t} \cdot \text{hod}^{-1}$ pary. Pre výpočet množstva tepla uvažujem, že ide čisto o páru, počítam s maximálnym prietokom. Teplota je 165°C . Pára sa odberom tepla ochladí na bod kondenzácie, kondenzuje a kondenzát sa ďalším odberom ochladí na 70°C . Latentné teplo predstavuje $2256,7 \text{ kJ/kg}$.

Tab.7.2. Prehľad veličín

Teplota (°C)	Merná entalpia sýtej kvapaliny (kJ/kg)
100	419,1
70	293,8
	Merná entalpia sýtej páry (kJ/kg)
165	2748
100	2607

Využitelná energia:

$$Q_A = M (\dot{i}_I'' - \dot{i}_{II}'') = 7000 \cdot (2748 - 2607) = 0,987 \cdot 10^6 [kJ / hod] \quad (7.7)$$

$$Q_B = M \cdot l = 7000 \cdot 2256,7 = 15,79 \cdot 10^6 [kJ / hod] \quad (7.8)$$

$$Q_C = M (\dot{i}_{III} - \dot{i}_{IV}) = 7000 \cdot (419,1 - 293,8) = 0,877 \cdot 10^6 [kJ / hod] \quad (7.9)$$

Celková energia získaná za hodinu:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = (0,987 + 15,79 + 0,877) \cdot 10^6 = 17,65 \cdot 10^6 [kJ / hod] \quad (7.10)$$

Tepelný výkon:

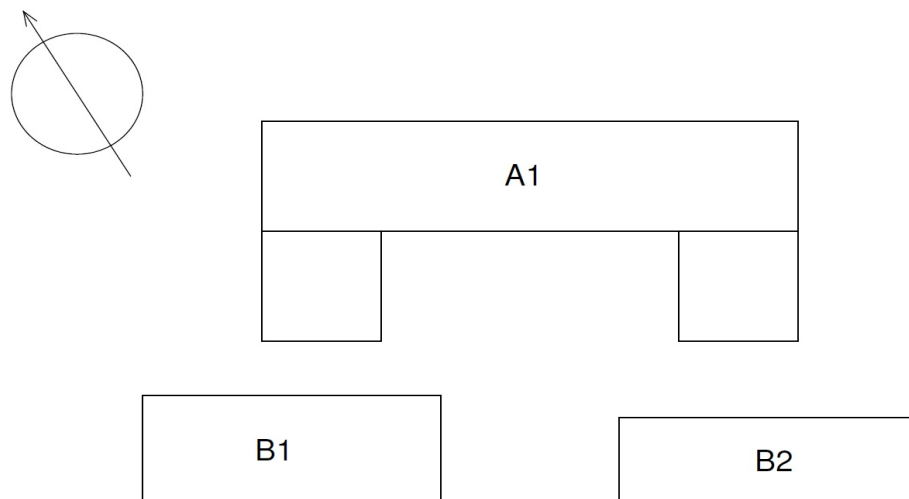
$$P = \frac{Q}{t} = \frac{17,65 \cdot 10^6}{3600} = 4,9 [MW] \quad (7.11)$$

Množstvo brodových par a daná využitelná energia závisí na okamžitom výkone bloku. Preto v danom návrhu s touto energiou nepočítam. [8]

7.2 Návrh vytápania

Kap. 7.1 poukazuje na množstvo energie v odpadnej vode. Z týchto miest by bolo možné odoberať odpadné teplo k ďalšiemu využitiu vhodným zariadením. V tejto kap. sa zameriam na návrh vhodného energetického zariadenia, ktoré by toto teplo využívalo pre následne vytápanie, poprípade ohrev teplej vody či chladenie budovy.

Obr. 7.1. Rozmiestnenie budov určených na návrh vytápania



Obr. 7.1 zobrazuje rozmiestnenie budov, s ktorými v návrhu počítam. Ide o budovy v areáli systému VVER 440/230, presnejšie JE v Jaslovských Bohuniciach.

Obr. 7.2 Satelitný pohľad na rozmiestnenie budov



Vytápanie ako také vyžaduje stabilnú dodávku energie. Z tohto hľadiska sa najvhodnejším možným riešením javí zdroj odpadného tepla z cirkulačnej chladiacej vody, vďaka veľkému prietoku a stálej dodávke množstva energie. Množstvo odvedeného tepla z tohto systému je dokonca väčšie než je potreba na vytápanie a ohrev úžitkovej vody. Teplota tejto vody je však pre vytápanie nízka, preto budem musieť túto teplotu o niečo zvýšiť vhodným energetickým zariadením.

7.3 Zdroj tepla, tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo (TČ) odoberá väčšiu časť energie pre vytápanie a prípravu teplej vody z okolného prostredia a približne 1/3 svojho výkonu, v závislosti na topnom faktore spotrebováva vo forme elektrickej energie pre pohon kompresoru. Z ekonomického hľadiska by sa dalo povedať, že ide o úsporný zdroj. Efektívne navrhnuté TČ ma pokrývať 2/3 celkovej potrebnej energie, dimenzovanie na plný výkon by po väčšine roka nebolo plne využité. Najväčšia tepelná strata sa v podstate prejaví len v mimoriadnych mrazoch, v našich zemepisných súradniciach pár dni v roku. TČ sa obvykle projektuje na 60 až 80 %

celkových tepelných strát objektu. Kladie sa dôraz na akumuláciu tepla, dôvod ochrana kompresoru proti častému zapínaniu a vypínaniu vplyvom výkyvov vonkajších teplôt. [9]

Výhody:

- Nízke prevádzkové náklady
- Dobrá regulovateľnosť
- Úspora za elektrickú energiu v dobe nízkeho tarifu
- Minimálne nároky na údržbu systému
- Nie je potreba komín

Nevýhody:

- Vysoké investičné náklady
- Zvláštne požiadavky na topný systém (nízka teplota topnej vody vyžaduje použitie všetkých otopných telies)
- Podľa druhu primárneho zdroja požiadavky na vonkajšie prostredie.

7.3.1 Návrh topnej sústavy s tepelným čerpadlom

Voľba topnej sústavy súvisí s použitím tepelného čerpadla, ako zdroja energie. Schéma tohto návrhu – príloha [G], zobrazuje dané zapojenie do sústavy. TČ dodáva energiu o nízkej teplote a preto nemôže spolupracovať s klasickými radiátormi, ktoré sú stavané na väčšie teploty. Vhodnejšie v tomto prípade sú nízko potenciálne sústavy teplovodného podlahového alebo teplovzdušného vytápania. Návrh tejto sústavy je spracovaný tak, že okrem vytápania môže sústava zaistiť aj priebežné vetranie priestoru, takže sústava teplovzdušná.

Príloha [G] zobrazuje tepelné čerpadlo ktoré odoberá teplo cirkulačnej chladiacej vode z hlavného vratného kolektoru. Prísun vody k TČ zaisťuje čerpadlo, oddelenie od chladiaceho okruhu zasa ventily. Prívod k TČ je situovaný tak, že ak by sa konala odstávka jedného bloku či veže dodávka vody bude v oboch prípadoch zaistená vďaka dvom vetvám, ktoré sú vyvedené z chladiaceho okruhu.

Teplo odobrané CCHV prečerpá TČ približne z 28 na 52 °C a predá ho do tepelného zásobníka. Vytápanie zaisťuje ohriaty vzduch, ktorý sa pomocou potrubia rozvedie do

vytápaných priestorov. Teplo akumulované v tepelnom zásobníku sa predáva vodným okruhom do tepelného výmenníka voda – vzduch, ktorý pripravuje teplý vzduch pre vytápanie. Čerstvý vzduch sa nasáva z vonku, prechádza rekuperačným výmenníkom a dostáva sa do tepelného výmenníka. Tu sa ohreje a postupuje rozvodom do výduchov pod oknami vytápaných miestností.

V prípade, že by TČ nestačilo dodávať dostatok tepelnej energie použijeme doplnkový zdroj. Zdrojom tepla je pára z odberov parných turbín reaktorových blokov. Teplo sa do topného systému predáva pomocou výmenníkovej stanice hlavného výrobného bloku. Jedna výmenníková stanica obsahuje základný a špičkový ohrievač.

Vo vytápaných miestnostiach sa vzduch ochladzuje a časť ho odchádza do rekuperačného výmenníka. Tu sa energia daného odpadného vzduchu využije k predohrevu čerstvého vzduchu. Odpadný vzduch po tom čo predá svoju energiu odchádza von do ovzdušia. Druhá časť vzduchu odchádzajúca z vyhrievaných miestností cirkuluje.

Dané teplovzdušné vytápanie zaistí úsporu energie, stálu výmenu potrebného objemu vzduchu a udrží jeho čistotu. Toto vytápanie patrí medzi nové a stále sa rozvíjajúce spôsoby vytápania. Nepokrýva len tepelné straty, ale zaručuje aj doporučenú intenzitu výmeny vzduchu v objekte. Výhodou je, že rozvody vzduchu do jednotlivých miestností môžu byť vedené bežnými stavebnými konštrukciami, taktiež úspora až 90 % nákladov na vetranie. Nevýhodou opäť vysoké investičné náklady, hlučnosť zariadenia a spotreba elektrickej energie pre pohon ventilátora. [8]

7.3.2 Výpočet potreby tepla na vytápanie

Pri tomto výpočte vychádzam z normy ČSN 06 0210. Potrebu TUV uvádza Vyhláška 428/2001. Je potreba zohľadniť tieto faktory, ktoré majú vplyv na celkový výpočet a vychádzajú z danej normy.

1. Určenie dĺžky topného obdobia
2. Stanovenie merného počtu dní a mernej teploty
3. Výpočet teploty pre jednotlivé dni topného obdobia
4. Výpočet tepelných strát v závislosti na zmene vonkajšej teploty v priebehu topného obdobia
5. Stanovenie celkovej potreby tepla pre vytápanie

Tab. 7.3. Tepelné straty objektov a potreba TUV

Budova	Tep. strata	Osôb	TUV	TUV
	kW		1/den	1/os.den
A1	463,54	60	1200	20
B1	197,86	30	600	20
B2	68,63	20	200	10
celkom	730,03	110	2000	50

Tab. 7.3 uvádza tepelné straty jednotlivých budov a hodnoty nutné k výpočtu potreby energie na prípravu TUV. Tieto straty boli vopred známe, nikde v diplomovej práci sa nevenujem ich samostatnému výpočtu.

Budem vychádzať z celkovej straty objektu, denného stupňa, vonkajších a vnútorných teplôt a výsledok skorigujem opravným súčiniteľom, podľa zdroja [24]

Hodnoty potrebné pre návrh sú stanovené [24]

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_i &= 0,9[-] & T_i &= 20^\circ C \\
 \varepsilon_e &= 0,8 & T_{e\min} &= -15^\circ C \\
 \varepsilon_d &= 1 & T_{es} &= 3,6^\circ C \\
 \eta_o &= 0,95 & d &= 219 \text{ dní} \\
 \eta_r &= 0,95
 \end{aligned}$$

Stanovenie opravného súčiniteľa:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_e \cdot \varepsilon_d}{\eta_o \cdot \eta_r} = \frac{0,9 \cdot 0,8 \cdot 1,0}{0,95 \cdot 0,95} = 0,8[-] \quad (7.12)$$

Počet denných stupňov, súčin dní topného obdobia a rozdielu priemernej vonkajšej teploty v topnom období a výpočtová vonkajšia teplota:

$$D = d \cdot (T_{es} - T_{e\min}) = 219 \cdot (3,6 - (-15)) = 4073,4 [^\circ C] \quad (7.13)$$

Ročná spotreba tepla:

$$Q_{v,r} = \frac{24 Q_c \varepsilon D}{T_i - T_{e\min}} = \frac{24 \cdot 730,03 \cdot 0,8 \cdot 4073,4}{20 - (-15)} = 1631 [MWh / rok] \quad (7.14)$$

7.3.3 Výpočet potreby tepla na ohrev úžitkovej vody

Pri tomto výpočte budem vychádzať z dennej potreby tepla, dĺžky topného obdobia a teploty studenej vody v lete a zime. Opäť postupujem podľa [24]

Hodnoty potrebné pre tento návrh:

$$\begin{array}{ll}\rho = 1000 \text{ kg / m}^3 & t_1 = 10^\circ \text{ C} \\ c = 4,182 \text{ kJ / kg.K} & t_2 = 52^\circ \text{ C} \\ V_{2p} = 1 \text{ m}^3 & t_{sv1} = 15^\circ \text{ C} \\ d = 219 \text{ dní} & t_{svz} = 7^\circ \text{ C}\end{array}$$

Denná potreba tepla:

$$Q_{t,d} = \rho \cdot c \cdot V_{2p} \frac{t_2 - t_1}{3600} = 1000 \cdot 4,182 \cdot 1 \frac{52 - 10}{3600} = 48,79 [\text{kWh}] \quad (7.15)$$

Ročná potreba tepla na prípravu TUV:

$$Q_{t,r} = Q_{t,d} \cdot d + 0,8 Q_{t,d} \frac{52 - t_{sv1}}{52 - t_{svz}} \cdot (350 - d) \quad (7.16)$$

$$Q_{t,r} = 48,79 \cdot 219 + 0,8 \cdot 48,79 \frac{52 - 15}{52 - 7} \cdot (350 - 219) = 14,88 [\text{MWh / rok}] \Rightarrow 53,6 [\text{GJ / rok}]$$

Ak podelím dennú potrebu tepla počtom hodín za deň, dostanem priemerný topný výkon potrebný na prípravu TUV, čomu odpovedá 2,033 kW.

7.3.4 Voľba súčastí

V tejto časti volím technologické súčasti do mojej topnej sústavy. Musím zvoliť vhodné tepelné čerpadlo, akumuláciu nádrž, vetraciu jednotku s rekuperáciou tepla, ohrievače vzduchu, obehové čerpadlá a ventilátory.

Pri výbere tepelného čerpadla budem vychádzať zo zvoleného zapojenia sústavy a zo stanovených tepelných parametrov, potrebám tepla. TČ musí svojím výkonom pokrývať 2/3 celkovej potreby energie. TČ bude napojené na akumuláciu nádrž požadovaného objemu. Rekuperačné výmenníky určím podľa požadovaných prietokov čerstvého vzduchu. Počítam s výmenou vzduchu v miestnosti $20 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ na osobu. [24]

Každá budova bude mať vlastný výmenník. Ohrievače vzduchu určím opäť pre jednotlivé budovy. Topný výkon TČ sa bude musieť vhodne rovnomerne rozložiť medzi tri vytápané objekty. K ohrievačom zvolím vhodné obehové čerpadlo opäť odpovedajúceho prietoku. Toto čerpadlo bude dodávať vodu ohrievačom.

Cirkuláciu topného vzduchu budú zaisťovať potrubné ventilátory. Ich prietoky musia odpovedať prietokom ohrievača zníženým o časť vzduchu ktorý prejde cez danú vetráciu jednotku s rekuperáciou.

Požadovaný výkon tepelného čerpadla:

$$P = \frac{2}{3} Q_C + Q_{t,R} = \frac{2}{3} \cdot 730,03 + 2,033 = 488,72 [kW] \quad (7.17)$$

Výkon prídavného prihrievania zaistený výmenníkovou stanicou:

$$P_p = \frac{1}{3} Q_C = \frac{1}{3} \cdot 730,03 = 243,34 [kW] \quad (7.18)$$

Objem akumuláčnej nádrže:

$$V = \frac{3600 \cdot Q_{t,d}}{\eta \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_{svz})} = \frac{3600 \cdot 48,79}{0,93 \cdot 1000 \cdot 4,182 \cdot (52 - 7)} = 1,004 [m^3] \quad (7.19)$$

Tab. 7.4 Zvolené technologické súčasti topnej sústavy

Zariadenie	Typ	počet/ks
Tepelné čerpadlo	Hennlich, G-TERM DS 6485.3	1
Akumulačná nádrž	REFLEX LS 1500	1
Vetracie jednotky	Atrea, Duplex	3
Ohrievače vzduchu	Atrea, TPO	7
Obehové čerpadlá	Hennlich, G-TERM GHN	4
Ventilátory	AVET	7

Tab. 7.4 zobrazuje energetické stroje zvolené v rámci topnej sústavy, vid' príloha [G]

Dané konštrukčné prvky popíšem podrobnejšie nasledovne.

Tepelné čerpadlo

TČ umiestnené na oceľovej rámovej konštrukcii s ohľadom na ľahký prístup ku všetkým komponentom. Celé zariadenie sa dodáva v prepojenom stave. Tlaková časť kompletne izolovaná. Chladivo R407c – výstupná teplota do 55 °C. Skrutkový kompresor, vyspelý riadiaci systém, dlhá životnosť.

Tab. 7.5 Tepelné čerpadlo firmy Hennlich, [25]

Typ	Menovitý príkon/výkon (kW)	Hmotnosť (kg)
DS 6485.3	91,2/491,6	1720

Akumulačná nádrž

Nádoba zásobníku vyrobená z kvalitnej oceli S235JRG2. Hygienický nezávadná voda vďaka vnútornému smaltovaniu podľa DIN 4753. Tepelná izolácia s bielou krycou plastovou fóliou.

Tab.7.6 Akumulačná nádrž firmy Reflex, [26]

Typ	Obsah (l)	Prevedenie
LS 1500	1500	Stacionárne

Vetracie jednotky

Vetracia jednotka patentovanej konštrukcie typu DUPLEX-S, určené pre komfortné vetranie. Možnosť vybavenia kompletným systémom merania a regulácie. Účinnosť rekuperácie až 90%.

Tab. 7.7 Objemy vzduchu, typy vetracích jednotiek, [28]

Budova	Osôb	Výmena vzduchu ($\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$)	Typ výmenníka
A1	60	1200	Duplex-S 1400
B1	30	600	Duplex-S 900
B2	20	400	Duplex-S 525

Počítam s výmenou vzduchu v miestnosti $20 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ na osobu, podľa [24]. Ako je vidieť každá budova má svoju samostatnú vetraciu jednotku. Tieto výmenníky umožňujú najvyššie možné prietoky v rozmedzí 515 až $1290 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

Ohrievače vzduchu

Univerzálne zariadenia pre ohrev vzduchu. Kompaktné jednotky rady DUPLEX, samozrejme možnosť použitia aj s inými zariadeniami. Prevedenia plášťa v pozinkovanom plechu. Ohrievače sú určené pre jednotlivé budovy.

Tab. 7.8 Ohrievače vzduchu, firma Atrea s.r.o., [28]

Budova	Tep. strata	Typ ohrievača	Počet (ks)
A1	463,54	TPO 15000.5	4
B1	197,86	TPO 8000.5	2
B2	68,63	TPO 6000.3	1

Obehové čerpadlá

Tieto čerpadlá odpovedajú požadovaným prietokom. Vodu do ohrievača bude dodávať obehové čerpadlo typu GHN 404 C-R. Na primárnej i sekundárnej strane čerpadlo typ GHN 804 B-R. Príkon 500W pri prietoku $25 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

Tab. 7.9 Obehové čerpadlá, firma Hennlich G-TERM

Typ	Počet (ks)
GHN 804B-R	2
GHN 404 C-R	2

Ventilátory

Rada ventilátorov AVET, konštruované pre pripojenie k vzduchotechnickému kruhovému potrubiu. Príruba ma normalizované pripojovacie rozmery. Možnosť práce vo všetkých polohách. Tieto ventilátory budú zabezpečovať cirkuláciu vzduchu v potrubíach.

Tab.7.10 Ventilátory, typ AVET, [27]

Typ	Prietok (m^3/hod)	Tlak (Pa)	Otáčky (min^{-1})	Príkon (W)	Počet (ks)
AVET 630 H/2	15000	175	1420	1500	5
AVET 630 H/1	10000	80	915	1100	1
AVET 500 P	8000	160	1395	750	1

7.4 Ekonomické zhodnotenie

Ekonomické hodnotenie daného spôsobu vytápania a odhad investícií. Výpočty sú orientačné. V tomto zhodnotení nepočítam s cenami potrubí vzduchotechniky, či montáže. Ceny technologických zariadení vrátane DPH som vyľadil vo firemných katalógoch. Investičné náklady daných energetických zariadení uvádzam v tab.7.11. Cena v Kč je cena pre daný počet kusov.

Tab.7.11 Investičné náklady

Zariadenie	Typ	počet/ks	Cena (Kč)
Tepelné čerpadlo	Hennlich G-TERM DS 6485.3	1	2 495 999
Akumulačná nádrž	REFLEX LS 1500	1	82 134
Vetracia jednotka	Atrea, Duplex	3	331 720
Ohrievač vzduchu	Atrea TPO	7	155 000
Obehové čerpadlá	Hennlich G-TERM GHN	4	88 704
Ventilátory	AVET	7	160 000
Súčet:			3 313 557

Tab.7.12. zobrazuje náklady na vytápanie. Vychádza z výpočtov potreby tepla na vytápanie a potreby tepla na ohrev úžitkovej vody. Daná celková ročná spotreba pri danom návrhu vytápania pomocou TČ naberá tieto hodnoty, vid' tab.7.12. Zdroj [29].

Ak by som porovnal náklady na vytápanie s iným druhom paliva, javí sa TČ ako jedno z najlepších možných variant. Priemerný ročný topný faktor, hodnota 3. Hodnota, ktorá predpokladá správne dimenzovanú inštaláciu, navrhnutá sústava prispôbená TČ. Materiálové náklady + montáž výpočet nezahrňuje.

Tab.7.12 Náklady na vytápanie

Druh	Cena tepla		Spotreba paliva/rok	Náklady na vytápanie
	Kč/GJ	Kč/kWh	kWh	Kč/rok
TČ	241	0,87	548 630	1 430 711

7.4.1 Porovnanie pôvodnej a navrhnutej topnej sústavy

Pôvodná topná sústava odoberá tepelný výkon zo sekundárneho okruhu formou horkej vody. Odoberaný výkon odpovedá celkovým tepelným stratám budov, taktiež tepelnému výkonu potrebnému na prípravu TUV. Výkon odoberaný zo sekundárneho okruhu je ovplyvnený účinnosťou prenosu tepla potrubím a taktiež účinnosťami tepelných

výmenníkov vo výmenníkových staniciach. Navrhnutý topný systém získava odpadnú energiu vo forme tepla z CCHV a vďaka tepelnému čerpadlu je schopný dodávať potrebný tepelný výkon. Prevádzka navrhnutej sústavy by bola hradená v rámci vlastnej spotreby elektrárne.

Približný odoberaný výkon zo sekundárneho okruhu:

$$P_{od,S} = \frac{Q_C + Q_{t,R}}{\eta_{POT} \cdot \eta_{VYM}} = \frac{730,03 + 2,033}{0,98 \cdot 0,96} = 778,128 [kWt] \quad (7.20)$$

Odoberaný výkon zo sekundárneho okruhu je iba približný, už len z dôvodu pôvodnej topnej sústavy. Pri tomto výpočte zahrňujem len účinnosť potrubia a tepelných výmenníkov.

Zvyšná časť celkovej tepelnej straty vytápaných budov:

$$P_Z = (Q_C + Q_{t,R}) - Q_{\dot{C}} = (730,03 + 2,033) - 394,8 = 337,26 [kWt] \quad (7.21)$$

Takže oproti pôvodnej topnej sústave sa zo sekundárneho okruhu za daných účinností potrubia a tepelných výmenníkov odoberá tepelný výkon:

$$P_{T,S} = \frac{P_Z}{\eta_{POT} \cdot \eta_{VYM}} = \frac{337,26}{0,98 \cdot 0,96} = 358,48 [kWt] \quad (7.22)$$

Rozdiel výkonov pôvodnej a navrhnutej sústavy:

$$P_R = P_{od,S} - P_{T,S} = 778,128 - 358,48 = 419,65 [kWt] \quad (7.23)$$

Za predpokladu, že príkon navrhnutých technologických zariadení nepresiahne 150 kW a prepočtom účinnosti premeny tepelnej energie na elektrickú je možné zistiť, či je navrhnutá topná sústava výhodná. Príkony jednotlivých zariadení udávajú výrobcovia vo

svojich katalógoch. Pre zjednodušenie výpočtu počítam s uvedenou hodnotou 150 kW. Elektrický príkon sa dá vyjadriť za pomoci účinnosti premeny energie v turbíne a v alternátore ako tepelný výkon dodaný sekundárnym okruhom.

K dodaniu elektrického výkonu je potreba daný tepelný výkon:

$$P_{ELE} = \frac{P_{R,C}}{\eta_{TUR} \cdot \eta_{ALT}} = \frac{150}{0,96 \cdot 0,97} = 161,08 [kWt] \quad (7.24)$$

Celková potreba tepelného výkonu dodaného sekundárnym okruhom:

$$P_{TEP} = P_{ELE} + P_Z = 161,08 + 337,26 = 498,34 [kWt] \quad (7.25)$$

Možnosť dvoch stavov a to:

1. Teplo dodáva tepelné čerpadlo a výmenníková stanica
2. Teplo dodáva iba tepelné čerpadlo

Stav 1. – teplo dodáva tepelné čerpadlo a výmenníková stanica

Porovnaním s pôvodnom topnou sústavou získam úsporu tepelného výkonu dodávaného sekundárnym okruhom:

$$P_{TEP,U} = 1 - \left(\frac{P_{TEP}}{Q_C + Q_{t,R}} \right) = 1 - \left(\frac{337,26}{730,03 + 2,033} \right) = 1 - 0,461 = 0,539 [-] \quad (7.26)$$

$$P_{TEP,U} \Rightarrow 100 - 46,1 = 53,9 [\%]$$

Navrhnutá topná sústava potrebuje k dodaniu rovnakého tepelného výkonu 46,1% tepelného výkonu zo sekundárneho okruhu oproti pôvodnej sústave. Úspora predstavuje 53,9%

Stav 2. – Teplo dodáva iba tepelné čerpadlo.

Výpočet úspory za stavu kedy TČ pracuje na plný výkon, no výmenníková stanica výkon ešte nedodáva.

$$P_{TEP,U\check{c}} = 1 - \left(\frac{P_{ELE}}{Q_{\check{c}}} \right) = 1 - \left(\frac{161,08}{394,8} \right) = 1 - 0,408 = 0,592 [-] \quad (7.27)$$

$$P_{TEP,U\check{c}} \Rightarrow 100 - 40,8 = 59,2 [\%]$$

V tomto prípade navrhnutá topná sústava potrebuje k dodaniu rovnakého tepelného výkonu 40,8% tepelného výkonu dodávaného pôvodnou sústavou. Úspora predstavuje 59,2%.

Ako máme možnosť vidieť, využitím odpadného tepla je možné dosiahnuť značných úspor tepelného výkonu odoberaného zo sekundárneho okruhu. Samozrejme, že behom prevádzky bude úspora kolísat'. Daný výpočet je orientačný a závisí na rôznych faktoroch.

8. Záver

Úmyslom diplomovej práce bolo vypracovať ucelený prehľad konštrukciou nízkotlakého regeneračného ohrievača vody pre jadrovú elektrárňu VVER 440 s výkonom 500 MWe po možných využitíach projektorových rezerv daného systému. Druhý celok spracováva využitie odpadnej vody, navrhuje technologický okruh, technické riešenie spôsobu vytápania a vyobrazuje energeticko – ekonomickú analýzu.

Úvod zobrazuje prierez jadrovej elektrárne tlakovodného typu VVER 440. Od primárneho okruhu JE, cez určenie jednotlivých parametrov sekundárneho okruhu až po následné využitie odpadného tepla. Ďalej poukazuje na dané využitie projektorových rezerv v rámci technických oblastí konkrétneho typu JE. Obsahuje celistvý konspekt o zmenách na vybraných systémoch a zariadeniach.

Nato práca demonštruje návrh nízkotlakého regeneračného ohrievača vody v danom systéme. Tento návrh znázorňuje súvislú rešerš koncepcie tohto zariadenia, ktorého výsledkom je zjednodušený výrobný postup, výkresová dokumentácia, či špecifikácie postupu zvárania WPS (viď prílohy). Navrhnutý nízkotlaký regeneračný ohrievač vody pre jestvujúci systém JE momentálne reálne nie je v prevádzke, ide o možný plán do budúcnosti. Daná koncepcia NTO 01 taktiež uvádza tepelný a hydraulický výpočet potrebný pre správnosť riešenia, prezentuje možnosti a problémy výroby tohto zariadenia, ktoré patrí medzi jedno z hlavných prvkov tohto systému.

Záverom diplomovej práce poukazujem na množstvo energie v odpadnej vode a rozoberám možný spôsob využitia. Popisujem návrh technického riešenia, schéma zapojenia, voľbu vhodných zariadení a porovnávam pôvodnú a navrhnutú topnú sústavu. Cieľom tejto kapitoly bolo dokázať, že využitím odpadného tepla je možné dosiahnuť značných úspor tepelného výkonu odoberaného zo sekundárneho okruhu. Aj keď je daný výpočet len orientačný a závisí na mnohých faktoroch, úspora je zjavná. Jednotlivé kapitoly vyslovujú závery momentálneho úseku diplomovej práce.

9. Použitá literatura

- [1] BEČVÁŘ, Josef a kol. Jaderné elektrárny. 1. vyd. SNTL/ALFA Praha 1988. 634 s. Celostátní vysokoškolská učebnice
- [2] DUBŠEK, František. Jaderná energetika. 1. vyd. Brno: skripta Fakulty strojní VUT v Brně, PC-DIR spol. s r.o., 1994. 207 s. ISBN 80-214-0833-2
- [3] HEJZLAR, Radko. Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 2. ČVUT Praha, 2005. ISBN 80-01-03189-6
- [4] HEŘMANSKÝ, Bedřich. Jaderná zařízení I. 2. vyd. ČVUT Praha 6, 1990. 185 s. ISBN 80-01-00405-8
- [5] KADLEC, Z. Termomechanika - návody do cvičení. 2.vyd. Ostrava: VŠB Ostrava 2008, 97 s.
- [6] Raček J.: Jaderné elektrárny. VUT v Brně, Brno 2002.
- [7] KOLAT, Úvod do JE, Ostrava, VŠB – TUO Ostrava 2012, 173 s.
- [8] ŠKRANC, K., HLAVINKA, M., Sekundární část JE VVER 440, část I. a II., ČEZ, Brno 1997
- [9] BOHŮN, V., Kooperace pasivního solárního systému a tepelného čerpadla, Brno 2008
- [10] KORNFEIL, S.R.O., [online], <http://www.kornfeil.cz/produkty/vyuziti-odpadniho-tepla>
- [11] www.allforpower.cz, Energetické investičné celky, 2010, 51 s.
- [12] R, Radko. Stroje a zařízení jaderných elektráren- 1. díl. Praha : Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2000. 211 s.
- [13] http://www.splav.kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=45
- [14] http://www.splav.kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=29#1
- [15] www.cesar.fme.vutbr.cz/informace/nezelezo/Fe41.htm
- [16] <http://cesar.fme.vutbr.cz/informace/nezelezo/Fe206.htm>
- [17] V, Pilous. Materiály a jejich chování při svařování. ANB, Plzeň 2009, 241 s.

- [18] V, Kudělka. Svařování tlakových nádob a zařízení, požadavky na materiál a dokumentaci. TDS Brno – SMS, s.r.o., www.tdsbrnosms.cz
- [19] Tlakové nádoby stabilní., ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA, ICS 23.020.10, 23.020.30, Prosinec 1997.
- [20] ŠIFNER,O. NĚMEC, F.: Termofyzikální vlastnosti obyčejné a těžké vody. Praha, Academia 1990.
- [21] DVOŘÁK,Z.: Sdílení tepla a výměníky. Praha, ČVUT 1992
- [22] ČERNÝ,V., JANEBA,B.,TEYSSLER,J.: Parní kotle. Praha, SNTL 1983.
- [23] JANALÍK,J.: Hydromechanika. Ostrava, VŠB – TUO, 1975.
- [24] <http://tzb.fsv.cvut.cz/?mod=podklady&id=1>
- [25] <http://www.g-term.sk/download/Cennik%20G-TERM%2005-2011%20tepelne%20cerpadla.pdf>
- [26] <http://www.topenilevne.cz/produkt-31873/reflex-akumulacni-nadrz-ls-1500.html#>
- [27] <http://www.ventilatory-kadlec.cz/cs/menu/zobrazit/10-rada-avet/>
- [28] <http://www.atrea.cz/>
- [29] <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/269-porovnani-nakladu-na-vytapani-podle-druhu-paliva>
- [30] CIHELKA, J., Vytápění a větrání, SNTL, Praha 1969
- [31] PETRIČKO.L, Konceptia jadrovej elektrárne tlakovodného typu, Ostrava 2010, 53 s.

10. Prílohy

- [A] Zjednodušené tepelné schéma sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440
- [B] Zjednodušený výrobný postup Plášť, NTO 01
- [C] Špecifikácia postupu zvarovania WPS 1
- [D] Špecifikácia postupu zvarovania WPS 2
- [E] Zostavný výkres NTO 01, č.v. 535 – PET.D – 196
- [F] Výrobný výkres, Trubkový systém, č.v. 535 – PET.D – 196 – 01
- [G] Schéma zapojenia topnej sústavy s tepelným čerpadlom
- [H] International Welding Technologist, IWT/CZ 11077